

---

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES E  
INGENIERÍA QUÍMICA**

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**TRATAMIENTO DE PLASMA DE BAJA PRESIÓN SOBRE  
POLIOLEFINAS**

**Autor: Christian Urbaneja Aranzana**

**Tutor: Miguel Ángel Martínez Casanova**

**OCTUBRE, 2011**

## Agradecimientos

Este proyecto no habría sido posible sin el apoyo de mucha gente. Gracias al Departamento de Materiales por las facilidades prestadas para realizar el proyecto, en especial a mi tutor, Miguel Ángel, por confiarme este estudio y encauzarme a su finalización.

Agradecerle a mi familia la motivación que me ha aportado, en especial a mis padres y mi hermana, que han sido la mano en el hombro que te acompaña en el camino.

Gracias a Natalia por haber estado siempre ahí, por creer en mí cuando sólo había sueños. A mis amigos, por acompañarme en muchas tardes y noches de trabajo y por estar ahí cuando fallan las fuerzas.

Gracias.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1 PROCESO TEÓRICO.....	12
1.1 EL PLASMA Y SU TECNOLOGÍA .....	12
1.2 MÉTODOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL CON PLASMA .....	14
1.2.1 Plasma en vacío .....	16
1.3 LA ADHESIÓN EN LOS POLÍMEROS .....	18
1.3.1 Mecanismos de actuación del plasma .....	20
1.4 INTERACCIÓN PLASMA-PARED .....	21
1.4.1 Aspectos teóricos .....	22
1.4.2 Clasificación de los fenómenos de interacción plasma-pared.....	22
1.5 ENERGÍA SUPERFICIAL, TENSIÓN SUPERFICIAL Y SUS MÉTODOS DE MEDICIÓN. ....	23
1.5.1 Energía superficial.....	23
1.5.2 Tensión superficial .....	23
1.5.3 Métodos de medición.....	25
1.5.3.1 Método de la placa.....	25
1.5.3.2 Método del anillo .....	26
1.5.3.3 Dispersión de líquido .....	27

1.5.3.4 Método de gota inclinada .....	27
1.5.3.5 Prueba de la mancha de tinta.....	27
1.5.3.6 Prueba de adhesión.....	28
1.5.3.7 Ángulo de contacto .....	28
1.6 MATERIALES Y SUS PROPIEDADES.....	32
1.6.1 Líquidos.....	32
1.6.1.1 Agua .....	32
1.6.1.2 Diyodometano.....	32
1.6.1.3 Etilmetilcetona .....	33
1.6.1.4 Glicerol.....	33
1.6.2 Polímeros.....	34
1.6.2.1 Polipropileno .....	34
1.6.2.2 Polietileno .....	35
1.7 ANTECEDENTES.....	37
2 PROCESO EXPERIMENTAL.....	40
2.1 TRATAMIENTO CON PLASMA .....	40
2.1.1 Descripción del equipo .....	40
2.1.2 Método del tratamiento de plasma.....	41
2.2 ÁNGULO DE CONTACTO .....	43
2.2.1 Descripción del equipo .....	43
2.2.2 Método de medición .....	46
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
3.1 ENSAYOS PLASMA.....	49
3.1.1 Introducción.....	49
3.1.2 Procedimiento de trabajo.....	50
3.1.3 Análisis de resultados.....	51
4 CONCLUSIONES .....	58
5 TRABAJO FUTURO.....	60
6 ANEXO DE DATOS.....	62
ANEXO I: TRATAMIENTO EN CÁMARA DE PLASMA .....	61
ANEXO II: VALORES PROMEDIADOS DEL TRATAMIENTOS DE PLASMA .....	95
7 BIBLIOGRAFÍA.....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Energías superficiales del polipropileno y polietileno antes y después de ser tratadas .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 2. Ángulos de contacto del HDPE.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 3. Ángulos de contacto del polipropileno.....</i>	<i>95</i>

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Variación del ángulo de contacto del agua destilada sobre la superficie de polietileno activada .....</i>	<i>52</i>
<i>Gráfica 2. Variación del ángulo de contacto del diyodometano sobre la superficie de polietileno activada .....</i>	<i>53</i>
<i>Gráfica 3. Variación del ángulo de contacto del agua destilada sobre la superficie de polipropileno activada .....</i>	<i>54</i>
<i>Gráfica 4. Variación del ángulo de contacto del diyodometano sobre la superficie de polietileno activada .....</i>	<i>54</i>

## *RESUMEN*

En este Proyecto de Fin de Carrera, mediante un equipo de plasma en vacío, se ha realizado un estudio sobre la efectividad del tratamiento superficial de polímeros; en este caso, los materiales a probar son el polietileno de alta densidad (PEHD) y el polipropileno (PP), aplicado en cámara de plasma.

En la evaluación del proceso se han empleado diferentes técnicas de caracterización. Se aplica un envejecimiento a las probetas mediante un tratamiento de plasma a baja presión. En este proyecto, el gas utilizado en estado de plasma es el aire. Para optimizar el resultado del tratamiento, se varía la potencia y los tiempos del tratamiento, realizando así un estudio más objetivo. La intención de este tratamiento

es aumentar la energía superficial del polímero en la superficie tratada y así conseguir optimizar su función en posteriores usos.

El estudio de la variación en la energía superficial para los polímeros tratados en la cámara de plasma se realizará midiendo el ángulo de contacto de varias gotas en la superficie de los polímeros. Apoyándose en esos ángulos de contacto, se obtiene la energía superficial de los polímeros tratados, que posteriormente reportarán unas conclusiones objetivas del estudio.

A lo largo de este proyecto se describen de manera más específica las técnicas, materiales y equipos utilizados para realizar los tratamientos y estudios necesarios.

## ABSTRACT

*In this End of Degree Project, using a vacuum plasma equipment, a study about the effectiveness of the surface treatment in polymers has been made; in our case, the materials to be tested are the high density polyethylene (PEHD) and the polypropylene (PP), applied in plasma chamber.*

*In the evaluation of the process different characterization techniques have been used. An aging is applied to the specimens by a low pressure plasma treatment. In this study, the gas used in plasma state is the air. To optimize the outcome of the treatment the power and the time are varied in order to get a more exhaustive study. The goal of this treatment is to increase the surface energy of the polymer in the treated surface and thus achieve and optimization of its function in later uses.*



*The study of the variation in the surface energy for the treated polymers in the plasma chamber will be make measuring the contact angle of some drops in the surface of the polymers. Using this contact angles we are able to obtain the surface energy of the polymers, that lately will report an obtective conclusions of the study.*

*Along this proyect, it is described in a more specific way the techniques, materials and equipments used to make the treatments and the necessary studies.*

## *OBJETIVOS*

Realizando los tratamientos superficiales en los polímeros se disminuye la energía superficial de éstos aumentando a su vez la capacidad receptiva de su superficie, mejorando así procedimientos posteriores acordes a su utilización como la impresión, adhesión, aplicación de recubrimientos, etc. En este estudio se realizan estos tratamientos con plasma, en concreto en cámara de vacío; aunque existen en el mercado gran variedad de equipos que realizan estos tratamientos o semejantes.

El principal objetivo de este proyecto es valorar la eficacia del tratamiento en probetas de polipropileno y polietileno con plasma en vacío. Para ello tenemos que seleccionar la mejor combinación de los factores variables de nuestro estudio, entre los que se encuentra:

- Las probetas de polipropileno y polietileno de alta densidad serán tratadas en la cámara plasma en vacío a diferentes potencias que nos ofrece el propio equipo, evaluando en todas ellas, gracias a la medición del ángulo de contacto, la eficacia de cada una de estas variables.
- Otra de las variables que influyen en el resultado obtenido es el periodo de tiempo en el que se le aplica el tratamiento, evaluando así cuándo se obtiene la mayor eficacia. Si la duración del tratamiento se alarga, el efecto conseguido aumenta hasta estabilizarse en un valor menos productivo que el óptimo.
- El siguiente objetivo es analizar los resultados obtenidos. A priori, se conoce una estimación del comportamiento que debe sufrir la superficie de la probeta después de cada tratamiento en la cámara de vacío. Estudiando la curva de las gráficas obtenidas y comparándola con la estimación, podemos encontrar los procesos que no han tenido el comportamiento deseado, descartando esos datos si fuera necesario y realizando el proceso de nuevo.
- Por último, una vez obtenidas las condiciones de las variables en las que el efecto realizado por el plasma sobre la superficie es máximo, se procede al cálculo de la energía superficial del polímero antes y después del proceso para conocer la evolución que ha sufrido el polímero.

# 1. PROCESO TEÓRICO

## 1.1 EL PLASMA Y SU TECNOLOGÍA

Como su propio nombre indica, la tecnología del plasma basa su aplicación en tratamientos con plasma. El plasma es un gas al que se le ha aplicado un tratamiento de gran cantidad de energía creando iones cargados positivamente y electrones libres, que a su vez poseen una gran cantidad de energía que les permite que, al moverse libremente, interactúen con otro material. La temperatura de los electrones, al estar tan cargados de energía y en continuo movimiento, adquieren una alta temperatura, aunque el promedio general del plasma tiene una temperatura muy semejante a la temperatura atmosférica. El plasma puede ser producido por varios fenómenos como un campo eléctrico oscilante, frecuencias de radio o microondas. Si se introduce un gas a baja presión en un campo eléctrico oscilante, los electrones ligados a átomos y moléculas sufren cierta aceleración debido a un aumento de su energía cinética, adquiriendo así un aumento de temperatura considerable. Si este calentamiento es suficientemente elevado, los electrones superan el umbral energético que les permite separarse de los átomos o moléculas generando en ellos iones positivos.

Cuando el material sobre el que actúa es un sólido, por regla general, éste actúa como sumidero para el plasma. Electrones e iones se precipitan sobre el sólido y se recombinan emergiendo como átomos neutros. Además, genera otros efectos como puede ser la ruptura de moléculas para formar especies reactivas o el calentamiento focalizado en una parte de la superficie.

El plasma se concentra en la parte superficial del material, siendo inerte para el resto del material de la probeta. Puede utilizarse, por tanto, para realizar trabajos específicos relacionados con la superficie del material, como puede ser la limpieza de la superficie plástica eliminando residuos existentes. En este aspecto, se considera más eficiente que limpiadores líquidos, porque no influyen aspectos como puede ser la porosidad misma del material, la rugosidad o su tensión superficial, que limitan el poder de este limpiador. Además, hay que tener en cuenta que se suprime el uso de disolventes para la limpieza y su posterior almacenaje y eliminación de residuos de los disolventes. También es de gran utilidad la limpieza con plasma en piezas con geometrías intrincadas, en los que las superficies pueden tener un acceso limitado para realizar una limpieza con líquidos.

Otro de los efectos que puede generar el plasma, el que se expone más en profundidad en este escrito, se trata de la activación de la superficie para aumentar la receptividad en el contacto de los materiales a tratar con otros, como pueden ser los adhesivos, serigrafía, etc. Para ello utilizaremos oxidantes como el oxígeno, nitrógeno, vapor de agua u óxido nitroso. El gas más utilizado que posea gran cantidad de estos materiales y que sea económico no es otro que el aire. El aire, en estado de plasma, en la superficie de plásticos provoca la creación de grupos que contienen oxígeno, que se encargan de aumentar la energía superficial aumentando así los enlaces entre los adhesivos y la superficie tratada.

Si el gas que utilizamos es un gas noble en vez de aire, sus efectos son distintos debido a que a la hora de reaccionar con el material a tratar, al ser un gas neutro no es posible la adhesión de átomos de argón o helio (los más utilizados) en los radicales de los polímeros. Así que su única función es la de transportar la energía del plasma a la superficie del polímero; esta energía provoca que los enlaces de las cadenas poliméricas se rompan. Estos puntos en los que se rompe la cadena son lugares en los que una reacción es mucho más factible que en el resto del polímero. Puesto que el gas utilizado es un gas noble, no es posible reaccionar con estas cadenas, por lo que la reacción se produce mediante una reestructuración de las cadenas rotas enlazándose entre ellas, obteniendo enlaces cruzados entre la cadena rota y su vecina. También puede generarse una forma de copolimerización, como son los insertos dentro del material.



*Figura 1 Pretratamiento de la carcasa de un teléfono móvil con una tobera de plasma.*

Aprovechando el conocimiento anterior sobre la alteración química del material utilizando oxígeno en estado de plasma para activar la superficie del material y así aumentar la tensión superficial del polímero, se empezó a investigar la alteración química del polímero con otros elementos químicos que le otorgaran diferentes propiedades. Se utilizó gases como el amonio para instaurar el radical amina en sus cadenas poliméricas para controlar así propiedades como el pH. Otros gases que se comprimen y transforman en plasma son el tetrafluoruro de carbono ( $\text{CF}_4$ ) y hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), consiguiendo así insertar en la cadena átomos de flúor que le den la propiedades del teflón; les convierte en una superficie hidrófoba e inerte en el aspecto químico, además de otorgarle la propiedad de ser extraordinariamente estable.

## 1.2 MÉTODOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL CON PLASMA

Hay distintos procesos que realizan un tratamiento superficial semejante al de cámara de plasma. Cada uno tiene sus propias características y cada uno es aconsejable en el ámbito apropiado.

- a) **Flameado:** Uno de los posibles tratamientos es el flameado de la probeta. La instalación, consistente en un quemador y un depósito de combustible, es una instalación bastante portable por lo que permite emplearla para el tratamiento

in-situ. Su efecto puede deberse a la elevada temperatura (de 1000 a 2000°C) de la llama o a reacciones con muchas especies excitadas de la misma.

Los parámetros importantes son la relación aire/gas y la naturaleza de éste, la distancia de la punta de la llama al objeto y el tiempo de tratamiento. La energía superficial del material a tratar mejora cuanto más oxidante sea la llama, pero no demasiado para no contaminar la superficie de productos residuales de la combustión.

Suele utilizarse para el tratamiento de objetos voluminosos como los parachoques y demás partes del automóvil fabricadas de polipropileno para poder pintarles luego acordes al color de la carrocería.

Esta tecnología posee consumo de energía muy elevado, comparado con el resto de técnicas, lo que provoca un alto coste unitario logrando un porcentaje de gas transformado en plasma de menos del 3%, además de generar gases propios de la combustión

- b) **Descarga en corona:** Es el aplicado con mayor frecuencia a películas y láminas de poco espesor y consiste en un generador de alta tensión y frecuencia que alimenta un rodillo metálico suspendido con toma de tierra. Este rodillo está recubierto por un aislante como poliéster, cerámica o elastómero de silicona.

El conjunto puede considerarse un gran condensador, formado por el electrodo y el rodillo como toma de tierra, y el aire como canal dieléctrico. La corona se forma cuando se aplica un alto voltaje que causa la ionización del aire y se forma un plasma, pudiéndose observar una luz azulada en el espacio intermedio sin que se produzca arco debido al aislamiento del rodillo. Una película que pase de modo continuo sobre el rodillo bajo los efectos de este plasma sufre modificaciones superficiales.

Tiene un consumo bajo, alrededor de los 300W, creándose un porcentaje de plasma alrededor del 3% y creando como única emisión ozono.

- c) **Plasma atmosférico:** La fuente de energía convierte la corriente alterna llegada desde la red en una corriente de una sola fase y mayor frecuencia. Esta energía alimenta el equipo de tratamiento. La energía obtenida se hace pasar por una corriente de aire que pasa a transformarse en plasma por medio de un electrodo especialmente diseñado para la aplicación. El equipo de soplado aplica esta energía a la superficie del material a través de una tobera. Solamente la cara del

material que experimenta el alto potencial debería presentar un incremento en la tensión superficial.

El consumo de este tratamiento es relativamente bajo, entre los 500 y los 1000W, creando una energía superficial muy alta sin producir ninguna emisión; además, es altamente aplicable a un proceso en línea con la ayuda de un sistema automatizado, por lo que es de los más utilizados en grandes producciones.

- d) **Cámara de plasma:** El plasma se genera en una cámara a muy bajas presiones en la que se introduce la pieza de trabajo. En el siguiente apartado se especificará más sobre este tratamiento.

El consumo de energía es el más bajo de todos estos tratamientos, no llegando a 200W. Transforma un porcentaje de plasma muy elevado llegándose a conseguir el 100%. Los contaminantes emitidos difieren en función del gas que insertemos en la cámara.

### 1.2.1 Plasma en vacío

Como se ha comentado anteriormente, este proyecto se centra en el tratamiento superficial con cámara de plasma en vacío

La instalación consta de una bomba de vacío, la cámara de plasma (figura 3) y un módulo externo (Plasmaflo), que posteriormente explicaremos con más detenimiento.





*Figura 2 Cámara de Plasma*

La cámara de plasma (Plasma Cleaner) se trata del cubículo en el que se introducen las probetas para ser tratadas; en este caso, únicamente tiene una bandeja para depositar el material a tratar, por lo que delimita su uso práctico para laboratorios de investigación y desarrollo. Su interior consta de una cámara de vidrio y, mediante una aplicación de radiofrecuencias, provoca en el plasma un campo eléctrico que crea el flujo de corriente. El Plasma Cleaner posee un interruptor que permite al usuario controlar la potencia de las radiofrecuencias que emitirá. Hay tres opciones: HIGH (29.6W), MEDIUM (10.15W) y LOW (7.16W). Estas frecuencias de radio excitan los electrones del gas que entra por la puerta de la cámara, siempre que la válvula de 3 vías se encuentre direccionada desde el interior de la cámara hacia el Plasmaflo. Esta acumulación de energía de los electrones hace que aumenten su velocidad y, a su vez, ionicen el gas transformándolo al estado de plasma.



*Figura 3. Vista frontal de la cámara de vacío (Plasma Cleaner)*

Para conseguir las bajas presiones en el interior de la cámara, se hace necesaria la utilización de la bomba de vacío que se encarga de extraer por la parte posterior de la cámara todo el aire que se encuentre en ella hasta conseguir que la presión en su interior se estabilice. Es necesario que esta bomba posea una velocidad mínima de bombeo de  $1,4 \text{ m}^3/\text{h}^{-1}$  y una presión total última de 200mTorr o inferior.

El Plasmaflo no es más que un instrumento encargado de controlar las entradas al Plasma Cleaner. Este módulo controla el aire que entra en la cámara; para ello, utiliza un caudalímetro que nos indica en SCFH ( $1 \text{ SCFH} = 0.472\text{l}/\text{min}$ ). El Plasmaflo posee una entrada que administra el gas que vamos a transformar en plasma conectándolo a una fuente; en el caso de estar abierta la entrada, lo que se introducirá será el aire de la habitación. Además del caudal de gas, este módulo informa de la presión en el interior de la cámara gracias a un sensor de presión. Esta información nos vendrá dada en millitorr ( $1\text{mTorr} = 10^{-3} \text{ mmHg}$ ).

Como hemos mencionado antes, el uso la cámara de plasma se limitará a laboratorios, aunque también puede ser utilizada para producción de elementos constructivos microelectrónicos, recubrimientos en óptica o sobre herramientas.

### 1.3 LA ADHESIÓN EN LOS POLÍMEROS

La facilidad de adhesión, en la mayoría de las superficies plásticas, no es una de sus principales cualidades. Esto es consecuencia de que químicamente no son reactivas

debido a que las cadenas poliméricas no poseen grupos funcionales; además se encuentra el inconveniente de que tiene una baja energía superficial, lo que perjudica su mojabilidad que permite que pocos líquidos sean capaces de mojar su superficie, que en el caso de los adhesivos, entorpece la unión entre ambos. Estos dos hechos ponen de manifiesto que cualquier adhesivo encuentra dificultades para adherirse a una superficie polimérica, tanto química como mecánicamente.

Los polímeros, en su gran mayoría, están formados por una gran cantidad de macromoléculas que le otorgan un gran peso molecular, además de tener una polaridad bastante baja cuando no son apolares. Los polímeros olefínicos, así como los fluorocarbonos, siliconas o vinilos, tienen una energía superficial bastante baja debido a que en su superficie poseen muy poca cantidad de iones cargados, por lo que no poseen huecos para que se produzca una reacción química.

Hay una serie de variables que impiden ser precisos en el valor de la energía superficial que se le otorga a los polímeros. Influyen variables como las distintas conductividades entre probetas del mismo material, la integración a su estructura de aditivos efectuada en el proceso de fabricación, o tener estructuras compuestas. En la fabricación del polímero han podido adquirir también distintas rugosidades. Todas estas variables en conjunto pueden hacer descender la energía superficial del polímero, consiguiendo que líquidos como el agua no consigan mojar el material; entre ellos, podemos incluir muchos adhesivos o tratamientos posteriores como pueden ser pintura o tintas. Considerando todas estas variables, se hace necesario un ensayo de tensión superficial en las piezas para conseguir una valoración objetiva de su energía superficial.

En muchas circunstancias se utilizan métodos como la cámara de plasma para mejorar la energía superficial propia del polímero. Hay ocasiones en las que, para no modificar la estructura original del polímero consiguiendo mejorar su energía superficial, es necesario reducir la duración del tratamiento drásticamente para que, en el caso de utilizar oxígeno a baja presión, no se produzcan enlaces entre el polímero y las moléculas de oxígeno liberadas en la transformación al plasma. Estos tiempos de tratamiento se encuentran entre 0.1 y 2 segundos en el interior de la cámara. Aunque el tiempo sea escaso, significa una mejora sustancial en el comportamiento frente a adhesivos.

Utilizando gases como el  $\text{NH}_3$  (amoníaco), conseguimos grupos funcionales como los grupos amino ( $\text{NH}_2$ ) para incluir en la estructura superficial del polímero átomos o moléculas que contengan nitrógeno, lo cual le aporta también una mejora en la receptividad de adhesivos al mejorar su energía superficial.

### 1.3.1 Mecanismos de actuación del plasma

En apartados anteriores se ha podido observar que la energía contenida en el plasma formado por electrones libres, iones, radicales, etc. la energía se transmite a la superficie del material produciendo una gran variedad de efectos muy importantes que serán consecuencia de excelentes mejoras.

- En el caso de utilizar el aire como gas de proceso, se encarga de ionizar las moléculas de oxígeno y nitrógeno, ambas muy reactivas con la superficie del polímero. Esto genera que se creen en el polímero grupos que contienen oxígeno que son muy efectivos a la hora de aumentar y fortalecer los enlaces con las moléculas del adhesivo.
- Provocan la ionización de los átomos neutros de las cadenas de la superficie del polímero debido a que los electrones bombardean con valores de energía mucho mayores que los necesarios para romper los enlaces de las moléculas situadas en la capa superficial. Estos enlaces tienden a reaccionar con los radicales libres de la cadena vecina o con los iones cargados de energía del plasma.
- Promueve la ruptura de moléculas formando especies reactivas mediante la creación de grupos que contienen –OH y –NH. Estos efectos, gracias a la adición de los átomos de oxígeno hacen que mejore considerablemente la energía superficial del polímero al formarse grupos polares, como grupos carbonilo, carboxilo, amidas, aminas o grupos hidroxilo.
- Elimina contaminantes orgánicos por reacción química (O<sub>2</sub> o aire en su defecto) o eliminación física (plasma de argón). Lo cual es muy útil en el caso de superficies porosas, puesto que la limpieza con cualquier disolvente no sería la adecuada. También sirve de gran utilidad en el caso de piezas con geometría intrincada porque, al ser un plasma, tiene acceso a cualquier recodo.
- El efecto es únicamente superficial; el resto del material no se ve alterado en ninguno de sus aspectos. En el caso de tratamiento con antorcha de plasma, su penetración en la pieza es de 5 a 10 nm, superando esa marca los tratados en la cámara de plasma. Depende del gas de proceso que se

utilice, se pueden conseguir efectos tan adversos como convertir la superficie de un polímero en hidrófila o hidrófoba.

- También se encarga de modificar las moléculas superficiales mediante mecanismos de entrecruzamiento químico y generación de copolímeros de injertos.

En la mayoría de las fábricas, el tratamiento con plasma está incluido en la línea productiva en los procesos industriales para realizarlo justo antes de la impresión, barnizados, pegado o cualquier otro proceso por el que se le ha aplicado el tratamiento con plasma. Esto es debido a que, una vez terminado el tratamiento con plasma, la superficie del material, en contacto con las condiciones ambientales, se degrada hasta alcanzar valores de tensión superficial similares a los que disponía originalmente. Esta degradación es debida a agentes atmosféricos como la humedad, la luz ultravioleta y la temperatura, que producen que las cadenas laterales de los polímeros se desplacen acelerando la degradación de la superficie.

Es importante darse cuenta de que un tratamiento excesivo de la superficie puede terminar en un bombardeo extremo de la estructura base del polímero, llevando así a la destrucción completa de la pieza. Dependiendo del proceso utilizado para el tratamiento, se pueden obtener resultados adversos. Algunos de los problemas asociados con el tratamiento excesivo con sistemas de activación atmosférica de superficies son: agujereamiento, degradación de la superficie (por ejemplo, regeneración de la ruptura de los materiales orgánicos de bajo peso molecular), aceleración en la velocidad de desvanecimiento del tratamiento, entre otros.

#### **1.4 INTERACCIÓN PLASMA-PARED**

La interacción plasma-pared se refiere a los fenómenos que tienen lugar como consecuencia del contacto del plasma con un cuerpo sólido, no sólo en la superficie de contacto, sino también en el interior del plasma y del sólido.

### 1.4.1 Aspectos teóricos

Cuando un plasma está en contacto con un sólido, lo que ocurre por regla general en todos los plasmas generados artificialmente, el sólido actúa como un sumidero para el plasma. Iones y electrones se precipitan sobre el sólido y se recombinan, emergiendo como átomos neutros que se vuelven a ionizar en el seno del plasma, normalmente por colisión con electrones. El sólido actúa como sumidero para el plasma y, a la vez, alimenta con neutros la fuente que genera nuevo plasma en sus proximidades. Este fenómeno se conoce como reciclado del plasma. Su fundamento se explica a continuación.

En un plasma, los electrones tienen una gran movilidad en comparación con los iones debido a la diferencia de masas entre ellos. Esto hace que los electrones puedan difundir rápidamente; pero con ello se crea un campo eléctrico de polarización por la separación de las cargas que, en ausencia de otra fuerza, hará retornar el flujo de electrones restableciendo la cuasineutralidad del plasma. Así, la difusión electrónica está limitada por la difusión iónica, proceso que recibe el nombre de difusión ambipolar.

Debido a esta diferencia de movilidad comentada, los electrones serán la primera especie en alcanzar una superficie expuesta al plasma. Esto provoca la aparición de un gradiente de potencial eléctrico en el plasma en contacto con la superficie, gradiente que se atenúa rápidamente por el efecto de apantallamiento de cargas a distancias del orden de la longitud de Debye.

La región en la que el potencial cae desde su valor en el plasma al “potencial flotante” de la superficie recibe el nombre de sheath (vaina o funda, en inglés), o sheath de Debye, para diferenciarlo del sheath magnético.

### 1.4.2 Clasificación de los fenómenos de interacción plasma-pared

Cuando el flujo de iones es acelerado en el sheath hasta la velocidad del sonido en el plasma (criterio del sheath de Bohm) e incide sobre la superficie, puede ocurrir una gran variedad de interacciones, que se pueden clasificar de acuerdo a su mecanismo físico subyacente en:

- Procesos de transferencia de momento (sputtering físico y backscattering).
- Procesos difusivos (RES).

- Procesos reactivo-difusivos (erosión química).

## **1.5 ENERGÍA SUPERFICIAL, TENSIÓN SUPERFICIAL Y SUS MÉTODOS DE MEDICIÓN.**

### **1.5.1 Energía superficial**

La energía superficial se define como la energía necesaria para romper los enlaces intermoleculares dando lugar a una superficie. En la física del sólido, las superficies deben ser intrínsecamente menos favorables energéticamente que la masa; es decir, debe haber una fuerza que genera la superficie. La energía superficial puede ser definida como el exceso de energía de la superficie de un material comparado con la que tendría si estuviera inmersa en la masa.

Para los líquidos, la tensión superficial (fuerza por unidad de longitud) y la densidad de energía superficial son idénticas. El agua tiene una densidad de energía superficial de  $0.072 \text{ J/m}^2$  y una tensión superficial de  $0.072 \text{ N/m}$ , lo que nos sirve de guía para conocer la reacción de la superficie ante posibles adhesivos con base acuosa.

Si se corta un sólido en piezas, se rompen sus enlaces y entonces se consume energía. Si el corte es reversible, la conservación de energía nos dice que la energía consumida en el proceso de corte debe ser igual a la energía inherente en las dos nuevas superficies creadas. La unidad de energía superficial de un material debe ser, por lo tanto, la mitad de su energía de cohesión, siendo el resto de condiciones iguales. En la práctica, esto es cierto solo para una superficie recién cortada preparada en vacío. Las superficies a veces cambian su forma de forma irreversible alejándose de modelos simples.

### **1.5.2 Tensión superficial**

En física se denomina tensión superficial de un líquido a la cantidad de energía necesaria para disminuir su superficie por unidad de área. Esta definición implica que



el líquido tiene una resistencia para aumentar su superficie. La tensión superficial (una manifestación de las fuerzas intermoleculares en los líquidos), junto a las fuerzas que se dan entre los líquidos y las superficies sólidas que entran en contacto con ellos, da lugar a la capilaridad. Como efecto tiene la elevación o depresión de la superficie de un líquido en la zona de contacto con un sólido.

A nivel microscópico, la tensión superficial se debe a que las fuerzas que afectan a cada molécula son diferentes en el interior del líquido y en la superficie. Así, en el seno de un líquido, cada molécula está sometida a fuerzas de atracción que en promedio se anulan. Esto permite que la molécula tenga una energía bastante baja. Sin embargo, en la superficie hay una fuerza neta hacia el interior del líquido. Rigurosamente, si en el exterior del líquido se tiene un gas, existirá una mínima fuerza atractiva hacia el exterior, aunque en la realidad esta fuerza es despreciable debido a la gran diferencia de densidades entre el líquido y el gas.

Otra manera de verlo es que una molécula en contacto con su vecina está en un estado menor de energía que si no estuviera en contacto con dicha vecina. Las moléculas interiores tienen todas las moléculas vecinas que podrían tener, pero las partículas del contorno tienen menos partículas vecinas que las interiores y por eso tienen un estado más alto de energía. Para el líquido, el disminuir su estado energético, es minimizar el número de partículas en su superficie. Energéticamente, las moléculas situadas en la superficie tienen una mayor energía promedio que las situadas en el interior; por lo tanto, la tendencia del sistema será disminuir la energía total, y ello se logra disminuyendo el número de moléculas situadas en la superficie, de ahí la reducción de área hasta el mínimo posible.

Como resultado de minimizar la superficie, ésta asumirá la forma más suave que pueda. De esta forma, el líquido intentará reducir cualquier curvatura en su superficie para disminuir su estado de energía de la misma forma que una pelota cae al suelo para disminuir su potencial gravitacional.

La tensión superficial depende de la naturaleza de las dos fases puestas en contacto que, en general, será un líquido y un sólido. Así, la tensión superficial será igual, por ejemplo, para agua en contacto con su vapor, agua en contacto con un gas inerte o agua en contacto con un sólido, al cual podrá mojar o no debido a las diferencias entre las fuerzas cohesivas (dentro del líquido) y las adhesivas (líquido-superficie).

Para un líquido dado, el valor de la tensión superficial disminuye con la temperatura debido al aumento de la agitación térmica, lo que redundará en una menor intensidad efectiva de las fuerzas intermoleculares. El valor de la tensión superficial tiende a cero



conforme la temperatura se aproxima a la temperatura crítica del compuesto. En este punto, el líquido es indistinguible del vapor, formándose una fase continua donde no existe una superficie definida entre ambos.

### 1.5.3 Métodos de medición

Se sabe que la tensión es una fuerza por unidad de longitud de línea de contacto trifásico. Para obtener el valor de la tensión superficial se hace necesario el uso de ciertos tipos de métodos de medición. Tales métodos se aplican por tanto al caso en que hay tres fases: un fluido (gas o líquido), un líquido, y un sólido. La tensión superficial entre los dos fluidos se mide como una fuerza aplicada sobre una cierta longitud de la línea de contacto trifásico. Con estos conocimientos se han diseñado procesos para obtener el valor de esta tensión:

#### 1.5.3.1 Método de la placa

Este método utiliza una placa de geometría rectangular, perfectamente conocida, suspendida verticalmente a una balanza de precisión (Fig. 4). El lado inferior de la placa se pone en contacto, horizontalmente, con la superficie del líquido para que se moje. Luego se ejerce una fuerza vertical sobre la placa para levantarla. La placa se levanta poco a poco, y de cada lado se forma una interfase curva; se levanta la placa hasta que se produzca el arranque de la superficie del líquido.

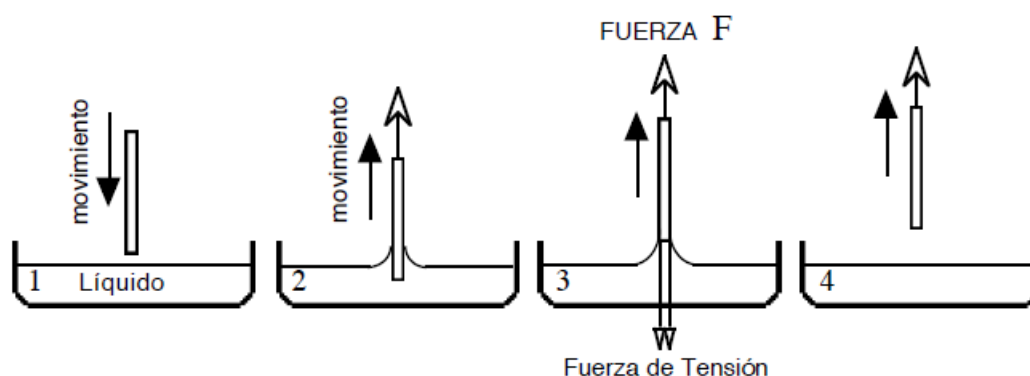
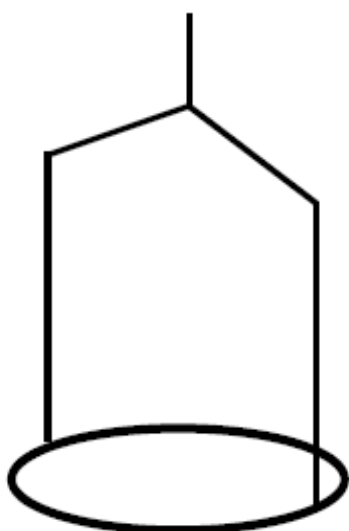


Figura 4. Pasos de la medición de placa

En la posición justo antes del arranque, se puede calcular el equilibrio de fuerzas entre las fuerzas de tensión que se aplican por parte de la placa y la fuerza de levantamiento  $F$ . Posteriormente se hace un balance de fuerzas, y de ahí se obtiene el valor de la tensión superficial que se necesita.

### 1.5.3.2 Método del anillo



En el método de Nouy (quien diseñó el método en 1919), se reemplaza la placa rectangular suspendida verticalmente por un anillo tórico suspendido horizontalmente, en forma perfectamente paralela con la superficie o interfase. Para medir la tensión superficial, se procede como en el caso del método de la placa. Primero se moja completamente el anillo y luego se procede a levantarlo hasta el arranque.

Necesitaremos la ayuda de un dinamómetro o cualquier instrumento de medición de fuerza para calcular esta fuerza de arranque.

Figura 5. Componente del método de anillo

Sin embargo, no es correcto aceptar la primera medida como válida porque no se sabe a ciencia cierta si ha alcanzado el tiempo de estabilización; así que, una vez que se ha llegado al punto de arranque, se desciende el anillo ligeramente y se vuelve a subir hasta un nuevo punto de arranque que nos aporta una fuerza distinta a la anterior. Se repite el proceso tantas veces como sea necesario hasta que la variación entre la última medida y la anterior sea irrisoria. Utilizando la fuerza obtenida podemos calcular la tensión superficial que posee ese líquido.

### 1.5.3.3 Dispersión de líquido

Esta prueba permite informar sobre la mejora de la energía superficial del sólido en cuestión. Consiste en verter un volumen conocido del líquido prueba sobre la superficie del material de estudio antes y después de su tratamiento de mejora de la energía superficial. Comparando el área anterior al tratamiento con la posterior a éste, podemos deducir si ha existido una mejora sustancial en la energía superficial del sólido.

### 1.5.3.4 Método de gota inclinada

Se coloca la superficie del material a tratar en posición horizontal; con la gota ya asentada, giramos la superficie hasta que alcance un ángulo entre la superficie y la horizontal en el que la gota comience a desplazarse. Se realiza esta acción antes y después del tratamiento y, contemplando la reducción del ángulo después del tratamiento en comparación con el conseguido en condiciones iniciales, podemos controlar el aumento de energía superficial que ha sufrido el material que queremos analizar. Dependiendo de la superficie que queremos analizar y la mejora en la energía superficial que queramos alcanzar, podemos utilizar distintos líquidos de tensiones superficiales conocidas para valorar el resultado en un rango de valores mucho más preciso.

### 1.5.3.5 Prueba de la mancha de tinta

Se pinta una superficie de algún tipo de tinta. Posteriormente, se deja secar situando la superficie en posición vertical. Debido al efecto que la gravedad produce en la capa de tinta de la parte pintada, hace deslizar la tinta hasta parte de la superficie que no había sido manchada con anterioridad. Depende en gran medida de la energía superficial de la superficie, pero en este experimento es más difícil ser objetivos debido a que es muy complicado que la capa de pintura sea uniforme, por lo que es posible que haya más volumen de tinta que no se encuentra adherido a la superficie y termine resbalando, manchando por debajo de la zona pintada.

### 1.5.3.6 Prueba de adhesión

Se aplica una cinta sensible a la presión, con una fuerza igual al material tratado y no tratado. Posteriormente, procedemos a despegar la cinta de presión y se mide la cantidad de fuerza requerida para arrancar la cinta del material. Una vez hecho el experimento antes y después del tratamiento, comparamos valores y discutimos su efecto.

Hay un método, mezcla de la cinta adhesiva y la macha con tinta, que consiste en manchar el material con una tinta, dejar secar un tiempo, y posteriormente aplicarle la banda adhesiva. Al despegarla, esta banda se habrá llevado cierta cantidad de la tinta con la que se manchó el material. Comparando las áreas de las manchas de tinta que la cinta se ha llevado, se puede llegar a una conclusión razonable.

### 1.5.3.7 Ángulo de contacto

Cuando depositamos una gota sobre una superficie plana, se encuentra que ésta se extiende sobre la superficie exhibiendo un determinado ángulo en la zona de contacto con la superficie. Este ángulo, conocido como ángulo de contacto, será menor cuanto más se extienda la gota sobre la superficie. El ángulo de contacto, como magnitud geométrica está definido como el ángulo que forman las interfaces sólido líquido y líquido vapor en el punto cualquiera de la línea de intersección de las interfaces de un sistema sólido-líquido-vapor.

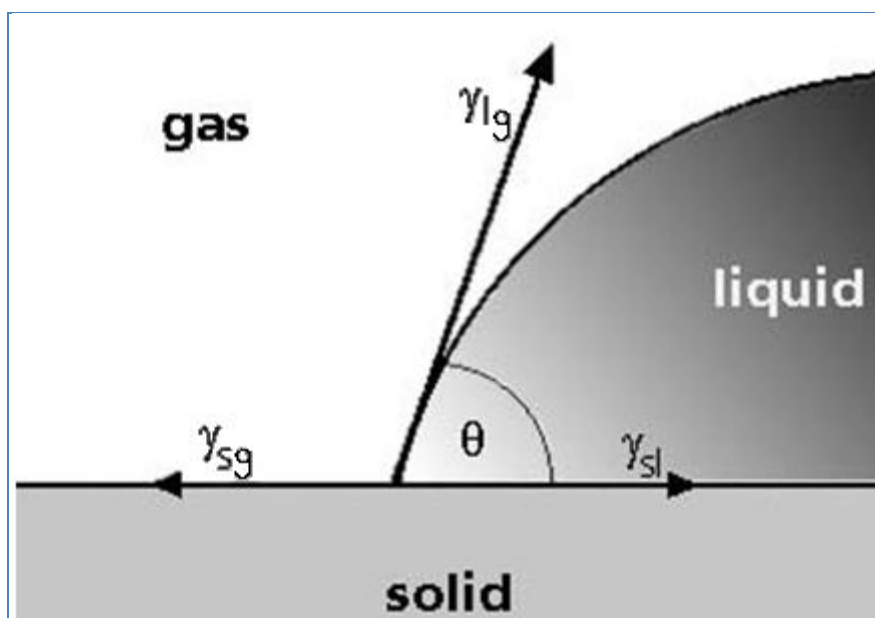


Figura 6. Ejemplo de un ángulo de contacto de un líquido en contacto con un sólido.

Cuando un líquido moja la superficie de un sólido, extendiéndose sobre ella y mojándola, crea una interfaz sólido-líquido que sustituye a la interfaz sólido-vapor que se encontraba anteriormente. La energía interfacial de la superficie mojada podrá ser mayor o menor que la superficie no mojada. El equilibrio viene determinado por cuáles sean los valores de las energías interfaciales. El coseno de ángulo de contacto  $\theta$  que exhibirá el líquido viene dado por el cociente entre la reducción de energía superficial del sólido seco con el mojado y la energía superficial del líquido que moja. Esta relación de equilibrio es conocida como la Ecuación de Young:

*Ecuación 1. Ecuación de Young*

$$0 = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} - \gamma \cos \theta_C$$

donde  $\gamma_{ij}$  representan las energías superficiales de las tres interfaces.

Cuando se habla de cómo un líquido moja la superficie de un cuerpo, es necesario valorar cómo de favorable, energéticamente hablando, es el mojado. Una vez mencionada la ecuación de Young, la mojabilidad es equiparable al valor del coseno del ángulo de contacto.

Para catalogar la mojabilidad ( $\mu$ ) de un sólido respecto a un líquido, se puede decir que, si la mojabilidad es positiva, el mojado es favorable; mientras que si es negativa, este mojado será desfavorable. Hay que precisar que no son más que términos, porque cada industria necesita unas propiedades distintas en sus materiales, y lo que en un campo puede considerarse desfavorable para sus propósitos, para otro puede ser favorable.

Considerando una gota de agua en una superficie sólida, si ésta es atraída por la superficie sólida, quedará completamente extendida; en ese caso, se supondrá que el ángulo de contacto será de  $0^\circ$ , esta superficie se considerará hidrófila. Cuanto menor sea la fuerza hidrófila de la superficie, mayor será el ángulo de contacto. Justo cuando el ángulo de contacto comienza a superar los  $90^\circ$  se le empieza a denominar a la superficie del material como superficie hidrófoba, llegando a alcanzar ángulos de contacto de alrededor de  $120^\circ$ . Estas superficies suelen estar tratadas para poseer radicales fluorados que le otorgan esta propiedad. También existen superficies, denominadas superhidrófobas, que pueden alcanzar ángulos de contacto que superan los  $150^\circ$  llegando a alcanzar hasta los  $180^\circ$ . En estos casos, la gota no moja la superficie, sino que se encuentra depositada en ella.

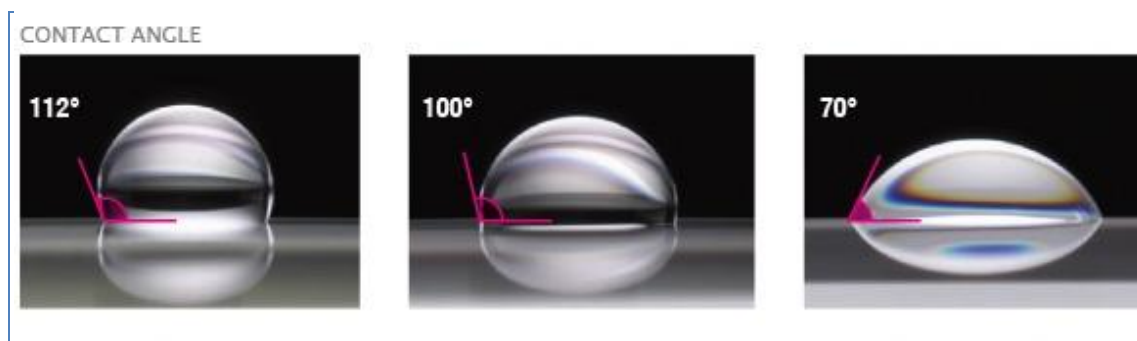


Figura 7. Gotas en superficies con distinta energía superficial, de menor a mayor, suponiendo el mismo líquido

Existen varios métodos de medición del ángulo de contacto, los principales son:

#### ***El Método Estático de Gota Sésil***

Para utilizar el método de la gota sésil es necesario un goniómetro de ángulo de contacto (medidor de ángulos) con un subsistema óptico para capturar el perfil de un líquido puro en una superficie sólida. El ángulo formado entre la interfase líquido-sólido y la interfase líquido-vapor es el ángulo de contacto. Los sistemas más antiguos

utilizan un sistema de microscopio óptico con luz de fondo. La actual generación de sistemas utiliza cámaras de alta resolución y software para capturar y analizar el ángulo de contacto.

### ***El Método Dinámico de Gota Sésil***

*La gota sésil dinámica es similar a la gota sésil estática, pero difieren en que la gota dinámica requiere ser modificada a lo largo del proceso. Un tipo común de estudio dinámico gota sésil determina el ángulo de contacto más grande posible sin aumentar la superficie interfacial sólido / líquido mediante el aumento del volumen de forma dinámica. Este ángulo es el ángulo máximo de avance. El volumen se reduce para producir el menor ángulo posible, el ángulo de retroceso. La diferencia entre el ángulo de avance y retroceso es la histéresis de ángulo de contacto.*

### ***Método Dinámico de Wilhelmy***

Un método para calcular el avance y retroceso promedio de los ángulos de contacto en los sólidos de geometría uniforme. Ambos lados del sólido debe tener las mismas propiedades. La fuerza de mojabilidad de un sólido se mide cuando el sólido se sumerge o se saca de un líquido de tensión superficial conocida.

### ***Método de Una Sola Fibra de Wilhelmy***

Es el método dinámico de Wilhelmy aplicado a las fibras individuales para medir el avance y retroceso de los ángulos de contacto

### ***Método de Polvo del Ángulo de Contacto***

*Permite la medición del ángulo de contacto y la velocidad media de absorción del polvo y otros materiales porosos. La variación del peso en función del tiempo tiene que ser considerado en la medición.*

Para este proyecto se ha elegido utilizar el método estático de gota sésil para reducir variables que pueden modificar el resultado.

## 1.6 MATERIALES Y SUS PROPIEDADES

### 1.6.1 Líquidos

#### 1.6.1.1 Agua

Uno de los líquidos a utilizar para medir el ángulo de contacto es el agua destilada ( $H_2O$ ), un líquido abundante y bien conocido, aunque peculiar.

El agua es una sustancia que químicamente se formula como  $H_2O$ ; es decir, que una molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno enlazados covalentemente a un átomo de oxígeno.

Ya que el oxígeno tiene una electronegatividad superior a la del hidrógeno, el agua es una molécula polar. El oxígeno tiene una ligera carga negativa, mientras que los átomos de hidrógenos tienen una carga ligeramente positiva del que resulta un fuerte momento dipolar eléctrico. La interacción entre los diferentes dipolos eléctricos de una molécula causa una atracción en red que explica el elevado índice de tensión superficial del agua.

La fuerza de interacción de la tensión superficial del agua es la fuerza de van der Waals entre moléculas de agua. La aparente elasticidad causada por la tensión superficial explica la formación de ondas capilares. A presión constante, el índice de tensión superficial del agua disminuye al aumentar su temperatura. También tiene un alto valor adhesivo gracias a su naturaleza polar.

#### 1.6.1.2 Diyodometano

Diyodometano o yoduro de metileno, comúnmente abreviado "MI", es un compuesto orgánico líquido. Al igual que el agua, también será utilizado para crear las gotas donde



medir el ángulo de contacto. Es insoluble en agua, pero soluble en éter y alcohol. Tiene un índice de refracción relativamente alto de 1,741, y una tensión superficial de 0,0508 N/m. El diyodometano es un líquido incoloro; sin embargo, se descompone al exponerse a la luz liberando yodo, cuyas muestras son de colores marrones.

Gracias a su alto peso específico, diyodometano se utiliza en la determinación de la densidad de minerales y otras muestras sólidas. También se utiliza como líquido de contacto para los refractómetros. Diyodometano es un reactivo en la reacción de Simmons-Smith, que sirve como fuente de metileno CH<sub>2</sub>.

Se trata de una mezcla nociva por inhalación y se pide evitar el contacto, haciéndose necesario el uso de guantes cuando se está manipulando el producto.

#### 1.6.1.3 Etilmetilcetona

La etilmetilcetona, también llamado butanona o MEK, es un compuesto químico orgánico de la familia de las cetonas. En condiciones ambiente, se presenta en forma de líquido incoloro inflamable, de olor dulzón y penetrante que recuerda a una mezcla entre caramelo y cetona. Es posible encontrar esta sustancia en la naturaleza dentro del reino vegetal, producido por algunos árboles y presente en pequeñas cantidades en frutos y vegetales. También se puede obtener industrialmente tratando el butanol, todo esto en grandes cantidades, produciendo alrededor de 700 millones de kilogramos anuales.

La butanona es un disolvente eficaz y común. Se utiliza en procesos de gomas, resinas, recubrimientos de acetato de celulosa y nitrocelulosa y en películas de vinilo. Por esta razón, se emplea en la fabricación de plásticos, textiles, en la producción de cera de parafina, y en productos para el hogar, tales como lacas, barnices, removedor de pintura, colas, y como agente de limpieza. Tiene propiedades similares al disolvente de acetona, pero se evapora a menor velocidad que éste.

Tiene un uso muy interesante como adhesivo, aprovechando que reacciona con el poliestireno; es más, este producto es denominado en ciertas ocasiones como “cemento de poliestireno”, utilizándose para juntas en maquetas a escala.

#### 1.6.1.4 Glicerol

Como su propia terminación indica, es un alcohol que está presente en la estructura de los triglicéridos. En nuestro organismo, esta sustancia, se produce en la metabolización

de los lípidos o en la fermentación de alcoholes. Por lo tanto, podemos afirmar que se trata de una molécula natural cuyo metabolismo y presencia es habitual y totalmente tolerada en cualquier organismo humano.

Es un líquido incoloro, neutro, de apariencia espesa, y con un sabor dulce muy característico. Tiene un punto de ebullición muy elevado; cuando lo enfriamos, su estructura se vuelve gelatinosa. Es soluble en agua y alcohol, pero insoluble en aceite. Como disolvente, el glicerol se comporta de forma magnífica, ya que es capaz de disolver sustancias que en principio no son solubles ni en alcohol, ni en agua.

Dentro de los principales usos se encuentran: la elaboración de cosméticos y de medicamentos en forma de jarabes.

## 1.6.2 Polímeros

### 1.6.2.1 Polipropileno

El polipropileno es un termoplástico semicristalino, que se produce polimerizando propileno en presencia de un catalizador externo específico. El polipropileno tiene múltiples aplicaciones, por lo que es considerado como uno de los productos termoplásticos de mayor desarrollo en el futuro. Es un producto inerte, totalmente reciclable, su incineración no tiene ningún efecto contaminante, y su tecnología de producción es la de menor impacto ambiental. Esta es una característica atractiva frente a materiales alternativos.

Hoy en día el polipropileno es uno de los termoplásticos más vendidos en el mundo, con una demanda anual estimada de 40 millones de toneladas. Sus incrementos anuales de consumo han sido próximos al 10% durante las últimas décadas, confirmando su grado de aceptación en los mercados.

La buena acogida que ha tenido ha estado directamente relacionada con su versatilidad, sus buenas propiedades físicas y la competitividad económica de sus procesos de producción. Varios puntos fuertes lo confirman como material idóneo para muchas aplicaciones:

- Baja densidad

- Alta dureza y resistente a la abrasión
- Alta rigidez
- Buena resistencia al calor
- Excelente resistencia química
- Excelente versatilidad

Una variable muy importante es la relación entre la longitud total de flujo y el espesor de la pieza que, para el caso del polipropileno, no debe superar un valor de 330. Es decir, que una pieza de 1 mm de espesor puede tener una longitud de 330 mm.

Por la excelente relación entre sus prestaciones y su precio, el polipropileno ha sustituido gradualmente a materiales como el vidrio, los metales o la madera, así como polímeros de amplio uso general.

### 1.6.2.2 Polietileno

El polietileno es un material termoplástico blanquecino, de transparente a translúcido, y es frecuentemente fabricado en finas láminas transparentes. Las secciones gruesas son translúcidas y tienen una apariencia de cera. Mediante el uso de colorantes pueden obtenerse una gran variedad de productos coloreados.

En general hay dos tipos de polietileno:

- De baja densidad (LDPE)
- De alta densidad (HDPE)

El de baja densidad tiene una estructura de cadena enramada, mientras que el polietileno de alta densidad tiene esencialmente una estructura de cadena recta.

Los termoplásticos pueden ser ablandados mediante calor repetidas veces y endurecidos mediante enfriamiento. Las resinas de polietileno son termoplásticas.

Las propiedades de las resinas de polietileno se deben principalmente, si no exclusivamente, a tres propiedades moleculares básicas: densidad, peso molecular promedio y distribución del peso molecular. Estas propiedades básicas dependen, a su vez, del tamaño, estructura y uniformidad de la molécula de polietileno. Algunas de las propiedades que hacen del polietileno una materia prima tan conveniente para

miles de artículos manufacturados son, entre otras: poco peso, flexibilidad, tenacidad, alta resistencia química y propiedades eléctricas sobresalientes.

La enorme competencia en el mercado de polietileno ha traído consigo más trabajos acerca de la modificación de polietilenos con propiedades específicas para aplicaciones determinadas. Son de esperar mejoras en propiedades parejas con determinados usos, a medida que se comprenda mejor la estructura de los diversos polímeros de polietileno y su relación con las propiedades físicas y químicas.

El polietileno de alto peso molecular es un sólido blanco y translúcido. En secciones delgadas es casi del todo transparente. A las temperaturas ordinarias es tenaz y flexible, y tiene una superficie relativamente blanda que puede rayarse con la uña. A medida que aumenta la temperatura, el sólido va haciéndose más blando y finalmente se funde a unos 110 °C, transformándose en un líquido transparente. Si se reduce la temperatura por debajo de la normal, el sólido se hace más duro y más rígido, y se alcanza una temperatura a la cual una muestra no puede doblarse sin romperse.

El polietileno ha encontrado amplia aceptación en virtud de su buena resistencia química, falta de olor, no toxicidad, poca permeabilidad para el vapor de agua, excelentes propiedades eléctricas y ligereza de peso. Se emplea en tuberías, fibras, películas, aislamiento eléctrico, revestimientos, envases, utensilios caseros, aparatos quirúrgicos, juguetes y artículos de fantasía.

En concreto, en este proyecto se han utilizado probetas de polietileno de alta densidad, que se caracteriza por tener distintas propiedades entre las que se encuentran:

- Excelente resistencia térmica y química.
- Muy buena resistencia al impacto.
- Es sólido, incoloro, translúcido, casi opaco.
- Muy buena procesabilidad, es decir, se puede procesar por los métodos de conformado empleados para los termoplásticos, como inyección y extrusión.
- Es flexible, aún a bajas temperaturas.
- Es tenaz.
- Es más rígido que el polietileno de baja densidad.
- Presenta dificultades para imprimir, pintar o pegar sobre él.
- Es muy ligero.
- Su densidad es igual o menor a 0.952 g/cm<sup>3</sup>.
- No es atacado por los ácidos, resistente al agua a 100°C y a la mayoría de los disolventes ordinarios.

## 1.7 ANTECEDENTES

Cuando a la sangre se le limpian de todos sus glóbulos, queda un líquido transparente, que fue nombrado el plasma (proveniente del griego, que significa “sustancia moldeable”) por el gran científico checo médico, Johannes Purkinje (1787 -1869). Posteriormente, el ganador del premio Nobel químico estadounidense Irving Langmuir utilizó por primera vez este término para describir un gas ionizado en 1927. Langmuir se acordó de que el plasma de la sangre transporta glóbulos rojos y blancos al igual que un líquido electrificado lleva los electrones e iones. Langmuir, junto con su colega Lewi Tonks, estaba investigando la física y la química de filamento de tungsteno, bombillas, con el fin de encontrar una manera de ampliar considerablemente la vida útil del filamento, un objetivo que finalmente logró alcanzar. En este proceso, él desarrolló la teoría de las vainas de plasma, la capa límite que se forman entre plasmas ionizados y superficies sólidas. También descubrió que ciertas regiones de un tubo de descarga de plasma presentan variaciones periódicas de densidad de electrones, lo que hoy en día denominamos las ondas de Langmuir. Esta fue la génesis de la física del plasma. Curiosamente, la investigación de Langmuir en la actualidad constituye la base teórica de la mayoría de las técnicas de procesamiento de plasma para la fabricación de circuitos integrados. Después de Langmuir, la investigación de plasma se extendió gradualmente en otras direcciones, de los cuales cinco son particularmente significativos.

En primer lugar, el desarrollo de la radiodifusión llevó al descubrimiento de la ionosfera de la Tierra, una capa de gas parcialmente ionizado en la atmósfera superior, que refleja las ondas de radio, y es responsable de que las señales de radio se puedan recibir cuando el transmisor se encuentra más allá del horizonte. Por desgracia, la ionosfera también de vez en cuando absorbe y distorsiona las ondas de radio. Por ejemplo, el campo magnético de la Tierra hace que las ondas con diferentes polarizaciones (en relación con la orientación del campo magnético) para propagarse a diferentes velocidades, produce un efecto que puede dar lugar a “señales fantasma”(es decir, las señales que llegan un poco antes, o un poco después, de la señal principal).

En segundo lugar, los astrofísicos rápidamente reconocieron que gran parte del universo se compone de plasma y, por tanto, que una mejor comprensión de los fenómenos astrofísicos requiere una mejor comprensión de la física del plasma. El pionero en este campo fue Hannes Alfvén, que en 1940 desarrolló la teoría magnetohidrodinámica, o MHD, en la que el plasma se trata esencialmente como un fluido conductor. Esta teoría ha resultado ser lo suficientemente amplia para investigar con éxito las manchas solares, las erupciones solares, el viento solar, la formación de estrellas, y un sinnúmero de temas de la astrofísica. Dos temas de especial interés en la teoría de MHD son la reconexión magnética y la teoría de la dinamo. La reconexión magnética es un proceso mediante el cual las líneas de los campos magnéticos cambian de repente su topología. Esto puede dar lugar a la conversión repentina de

una gran cantidad de energía magnética en energía térmica, así como la aceleración de algunas partículas cargadas a energías extremadamente altas, y se cree que es el mecanismo básico que se esconde detrás de las llamaradas solares. La teoría de la dinamo estudia cómo el movimiento de un fluido MHD puede dar lugar a la generación de un campo magnético macroscópico. El campo magnético de la Tierra se mantiene por el movimiento de su núcleo fundido, que puede ser tratado como un fluido MHD con una aproximación razonable.

En tercer lugar, la creación de la bomba de hidrógeno en 1952 generó un gran interés en la fusión termonuclear controlada como fuente de energía posible para el futuro. Al principio, esta investigación se llevó a cabo en secreto, y de forma independiente, por los Estados Unidos, la Unión Soviética y Gran Bretaña. Sin embargo, en 1958 la investigación sobre fusión termonuclear fue desclasificado, dando lugar a la publicación de una serie de documentos sumamente importantes e influyentes a finales de 1950 y principios de 1960. En términos generales, la física teórica del plasma surgió como una disciplina matemática rigurosa en estos años.

En cuarto lugar, el descubrimiento de James A. Van Allen, en 1958, de los cinturones de radiación Van Allen que rodean la Tierra, usando los datos transmitidos por el satélite de EE.UU. Explorer, marcó el inicio de la exploración sistemática de la magnetosfera de la Tierra por satélite, y abrió el campo de la física relativo al plasma. Los científicos espaciales tomaron prestada la teoría de la captura de plasma por un campo magnético de la investigación de la fusión, la teoría de ondas de plasma de la ionosfera, la noción de la reconexión magnética como un mecanismo de liberación de energía y la aceleración de partículas a partir de la astrofísica.

Por último, el desarrollo de láseres de alta potencia en la década de 1960 se abrió el campo de la física del plasma láser. Cuando un rayo láser de alta potencia golpea un objeto sólido, el material es inmediatamente eliminado, y un plasma se forma en el límite entre el rayo y el objetivo. Plasmas láser tienden a tener propiedades bastante extremas (por ejemplo, la densidad característica de los sólidos) que no se encuentra en los plasmas más convencionales. Una de las principales aplicaciones de la física del plasma láser es el método de la energía de fusión, conocida como fusión por confinamiento inercial. En este enfoque, los rayos láser se utilizan para implosionar un material sólido y pequeño hasta las densidades y temperaturas características de la fusión nuclear (es decir, el centro de una bomba de hidrógeno) y se ha logrado. Otra aplicación muy interesante de la física del láser de plasma es el uso de los campos eléctricos muy fuertes generados cuando un pulso de láser de alta intensidad pasa a través de un plasma para acelerar las partículas. Los físicos de alta energía esperan poder utilizar técnicas de aceleración de plasma para reducir drásticamente el tamaño y el costo de los aceleradores de partículas.

También se observó que las partículas del plasma se distribuyen de manera tal que cualquier campo eléctrico que se genere en el plasma, ya sea por separación espontánea de sus cargas o por medios externos al sistema, tiende a ser blindado por éste. Este fenómeno recibe el nombre de blindaje de Debye por haber sido Petrus J. Debye (1884-1966) el primero en estudiarlo. Otra característica descubierta ya en aquella época tiene que ver con la existencia de una frecuencia natural de oscilación del plasma. Esta llamada frecuencia de plasma depende de la densidad del mismo, siendo mayor mientras mayor es la densidad.

La existencia de esta frecuencia característica tiene importantes consecuencias en la propagación de ondas electromagnéticas en un plasma. A diferencia del vacío o de un gas neutro, ondas electromagnéticas de frecuencia inferior a la frecuencia característica, no se propagan en un plasma. Este hecho explica, por ejemplo, la razón por la cual un vehículo espacial reingresa a la atmósfera y se interrumpen sus comunicaciones con La Tierra. En efecto, debido a la fricción del vehículo con la atmósfera, la temperatura aumenta, lo que produce la ionización de esta última en torno al vehículo, generándose así un plasma en el cual las ondas de radio son inferiores a la frecuencia característica de éste, con la consiguiente interrupción de las comunicaciones.

## 2. PROCESO EXPERIMENTAL

### 2.1 TRATAMIENTO CON PLASMA

#### 2.1.1 Descripción del equipo

El tratamiento de plasma se realizará mediante una cámara de plasma comercializada por Harrick Plasma; las probetas de polipropileno o polietileno serán introducidas en la cámara de plasma (Plasma Cleaner PDC-002). Para completar la instalación es necesario que esta cámara se encuentre conectada al módulo destinado a controlar las entradas en la cámara (Plasmaflo) y una bomba de vacío, encargada de reducir las presiones en el interior de la cámara.



Para comprender con mayor facilidad el funcionamiento de todos estos sistemas juntos, se expone a continuación un esquema simplificado de cómo se conectan unos componentes con otros.

Para tratar superficialmente las probetas de polipropileno se utilizará una cámara de plasma (Plasma Cleaner PDC-002). La cámara lleva asociada una bomba de vacío y un módulo (Plasmaflo), que permite controlar los flujos de gas y la presión de vacío que se genera en el interior de la cámara. El esquema de la instalación se muestra en la figura 8.

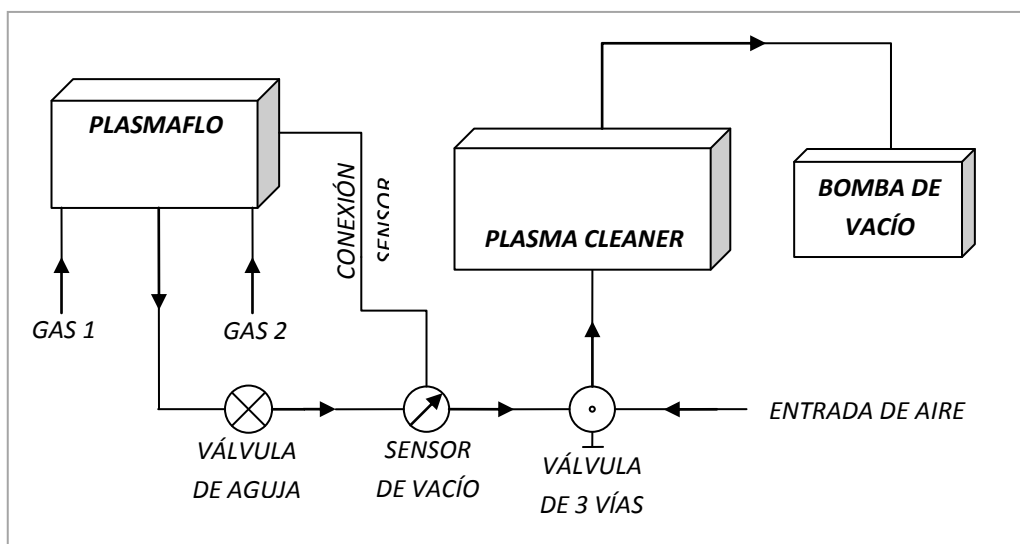


Figura 8. Esquema de la instalación

El funcionamiento particular de cada instrumento se encuentra explicado con anterioridad en el apartado 1.2.1.

### 2.1.2 Método del tratamiento de plasma

Los pasos que se han seguido para realizar los ensayos son bastante sencillos, pero hay que tener en cuenta ciertos aspectos, sobre todo relativos a la seguridad, debido a que trabajamos con gases a baja presión. Como en este proyecto el gas utilizado es el aire de la atmósfera, podemos prescindir de las bombonas de ciertos gases comprimidos

que le pueden aportar un plus de peligrosidad al tratamiento. Para realizar la activación de la probeta hemos realizado los siguientes pasos:

1. Limpiamos la superficie que queremos tratar con metiletilcetona para eliminar posibles elementos orgánicos que puedan reaccionar con las moléculas de oxígeno o nitrógeno descompuestas al transformarse en plasma el aire.
2. Se introducirán las probetas de polipropileno en el interior de la cámara. Se tendrá especial cuidado en usar guantes de látex para no ensuciar la superficie de la probeta.
3. Una vez introducida la probeta en el interior del cubículo, se activará la bomba de vacío para extraer el aire de la cámara. Una vez activada la bomba, se abre la válvula de aguja para extraer de los conductos el aire que se encuentra en su interior, puesto que puede suponer un aumento en la presión de su interior. La válvula de tres vías debe estar direccionada de tal manera que una el interior de la cámara con el Plasmaflo para controlar el flujo de aire introducido en la cámara.
4. La presión en el interior de la cámara irá descendiendo hasta que alcance una presión de vacío aceptable, alrededor de los 400 miliTorr. Cuando se llegue aproximadamente a ese valor, se abrirá la entrada de aire en el interior de la cámara con el dosificador situado en el módulo Plasmaflo. Para controlar la cantidad de aire que entra en la cámara, el Plasmaflo consta de unos caudalímetros; situamos la entrada de aire en valores entre el 0.4 y 0.6 SCFH. Llegado a este punto habrá que esperar un tiempo hasta que la presión en el interior de la cámara se estabilice.
5. Cuando el valor de la presión haya alcanzado un valor casi constante procederemos a poner en marcha el Plasma Cleaner. Se acciona el botón de encendido y elegimos la potencia de las radiofrecuencias que generarán el estado de plasma en el aire (bajo, medio o alto). Casi instantáneamente, se generará el plasma que se caracteriza porque el aire incoloro del interior adquiera un intenso color rosa, y es en ese momento cuando empezamos a contar el tiempo de proceso de la probeta. Se han escogido tiempos diferenciados que permitan plasmar una gráfica de datos lo más aproximada a la teórica. Los tiempos que hemos probado han sido de 1, 3, 5, 10 y 15 minutos.
6. Cuando el tiempo establecido para el tratamiento llega a su fin, procederemos a apagar la cámara de plasma y bomba de vacío, en ese orden, y giraremos la válvula de tres vías para que conecte el interior de la cámara con el exterior, con lo que conseguiremos que la presión en el interior de la cámara sea igual que en el exterior, lo que nos permitirá abrir la compuerta y sacar la probeta tratada.

7. Si en lugar de aire se utiliza un gas comprimido, se tiene que tener especial atención a la hora de cerrar en primer lugar la válvula más próxima a la bombona que contiene ese gas. Después, hay que abrir todas las válvulas restantes empezando desde la más alejada a la bombona del gas. Una vez que no quede nada de gas en el interior de los conductos procedemos a cerrar las válvulas que hemos abierto anteriormente pero en orden inverso, es decir, empezando por la más cercana a la bombona y terminando por la más alejada.

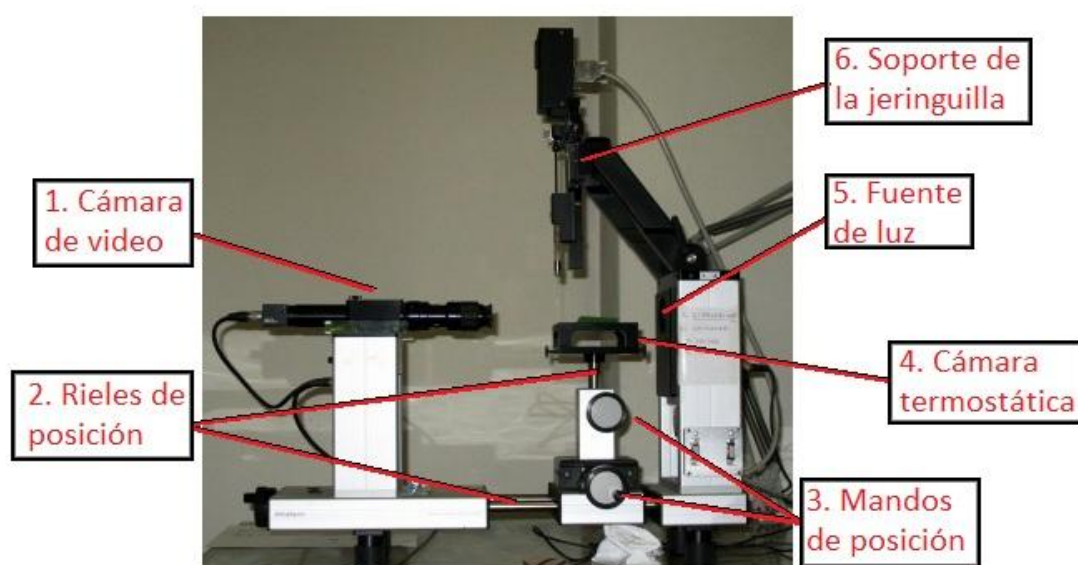
## 2.2 ÁNGULO DE CONTACTO

Terminado el tratamiento de plasma, comienza la obtención de datos. Para ello necesitamos un equipo de medida de ángulos de contacto, que explicaremos a lo largo de este apartado. En primer lugar, se verá una descripción del equipo y su funcionamiento en general para, posteriormente, estudiar el método de medida del ángulo de contacto que en nuestro caso se trata del método de gota sésil o gota en reposo, utilizado para realizar las medidas en este proyecto.

Una de las principales aplicaciones de la medida del ángulo de contacto, la necesaria para el objetivo de este proyecto, es el cálculo de la energía superficial.

### 2.2.1 Descripción del equipo

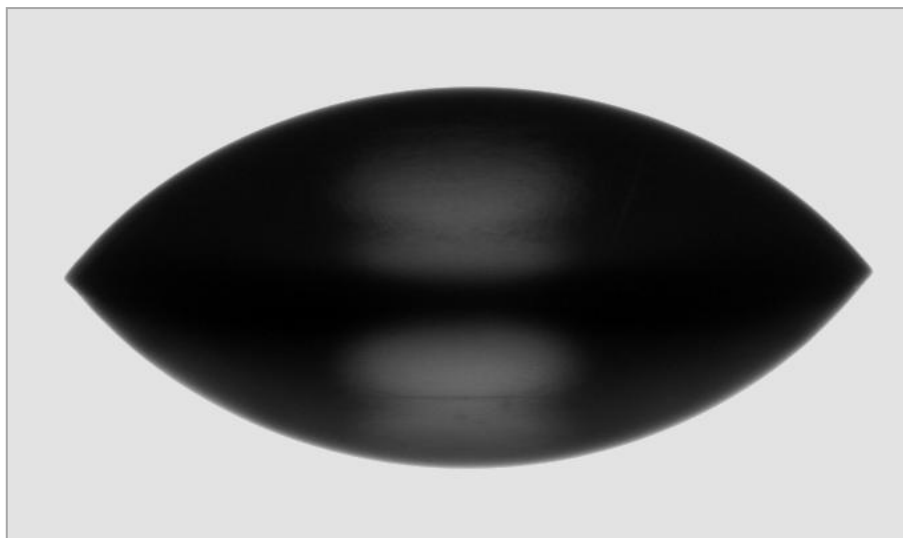
Para poder calcular el ángulo de contacto es necesario primero explicar en qué consiste este equipo. Existe una cámara de video digital con un ocular CCD, que será el encargado de enviar la imagen al ordenador para poder calcular el ángulo entre la superficie sólida y la gota. Una vez que la imagen es suficientemente nítida, se puede decidir si calcular este ángulo de forma manual o automática, gracias a que el software te ofrece esta opción. De manera manual tardamos más, pero el contorno puede ser modificado hasta obtener el deseado. Sin embargo, de forma automática se corre el riesgo de que el programa no haga coincidir el contorno creado por él con el perfil real de la gota; sin embargo, si la silueta de la gota y su reflejo en la superficie es muy nítida, el cálculo automático es tan válido como el manual, e incluso mejor.



*Figura 9. Imagen del equipo de captura para medición del ángulo de contacto*

Aparte de la cámara de video, el equipo consta de una fuente de luz que, gracias a un material translúcido, llega difusa de su foco. Entre la cámara y esta fuente de luz se encuentra una cámara donde se deposita la probeta del polímero. La cámara posee un cierto ángulo de inclinación con respecto a la probeta y el foco de luz. Esta inclinación tiene explicación al encontrarse a contraluz y, gracias a la inclinación, se consigue representar el perfil de la gota y también el de su gota reflejada en la superficie, lo cual nos permite diferenciar con notable precisión la línea de contacto entre la gota y la superficie de la probeta, como se puede observar en la imagen de la figura.

Combinando en su mejor medida todas estas variables mencionadas anteriormente, podemos mejorar la nitidez de la imagen; ahí es donde reside la destreza del usuario: cuanto mejor se distingan las siluetas de cada componente, más precisos serán los resultados de la medición del ángulo de contacto.



*Figura 10. Imagen de una gota obtenida con el equipo de medida de ángulos de contacto.*

Las posibles variables que nos permiten realizar una captura nítida de la gota sobre la superficie son las siguientes:

1. **La distancia de trabajo.** Esta distancia se podrá modificar mediante un conjunto de rieles (figura 9.2) y mandos (figura 9.3) que permiten modificar la posición del soporte de la probeta. También se podrá variar el ángulo de inclinación de la cámara.
2. **La amplitud del zoom.** Modificable mediante una ruleta situada en la propia cámara que modifica las lentes para conseguir ese aumento.
3. **El contraste.** Se puede distinguir con mayor facilidad la silueta de la gota aumentando o reduciendo el contraste; para ello, se incrementa o disminuye la intensidad de la fuente de luz (figura 9.5) con un mando situado en la parte posterior del foco luminoso.
4. **El enfoque de la lente.** Abriendo o cerrando el objetivo, se administra la cantidad de luz que recoge la lente, consiguiendo así mejorar la nitidez de la imagen.

Los componentes fundamentales del equipo de medición son los siguientes:

1. **Jeringuilla.** Permite depositar en la superficie de la probeta una gota con excelente precisión gracias a los mandos que modifican la posición de la probeta y los de la jeringuilla y también, al sistema regulador de avance del émbolo de la jeringa.
2. **Cámara termostática.** Se trata de una cámara de vidrio o cuarzo con una apertura en la parte superior donde se situará la aguja de la jeringuilla. Esta pequeña cámara se encuentra aclimatada gracias a un baño termostático. Colocaremos en su interior el líquido de las jeringuillas para que no haya contraste de temperatura cuando se deposite la gota en la probeta.
3. **Cámara CCD.** Consta de un ocular con una cámara de video digital. El conjunto se encuentra unido a un ordenador que reproduce la imagen que recibe de la cámara.
4. **Fuente de luz.** Optimiza la imagen de la gota, distinguiéndose con mayor claridad las formas de la imagen, aumentando o disminuyendo la intensidad de la luz.
5. **Software.** Con la ayuda de un programa informático podemos analizar la gota y obtener resultados objetivos.

### 2.2.2 Método de medición

Como se ha comentado con anterioridad en el apartado 1.5.3, el método de medición de la energía superficial elegido será el de la gota sésil o gota en reposo. Se elige este método para que la variación de la superficie de la gota sea mínima, debido a que es imposible que no exista cierta variación en su superficie, modificando consigo el valor del ángulo de contacto. Estas variaciones del ángulo de contacto se deben a interacciones entre el líquido, el gas y el sólido. Estas interacciones de las que hablamos se podrían reducir a las más importantes, que son:

1. **Evaporación del líquido.** Aunque la cámara termostática mantiene prácticamente constante la temperatura en el interior y la jeringuilla posee el líquido que estaba en el interior de la cámara con anterioridad, es factible una pequeña evaporación.
2. **Migración de surfactantes.** Activadores de la superficie del sólido que migran a la superficie del líquido variando sensiblemente la tensión superficial del líquido disminuyendo el ángulo de contacto.

3. **Migración de sustancias.** Sustancias disueltas en la gota que migran a la superficie del sólido (o en sentido inverso) que modifican las propiedades del sólido o del líquido variando con ello el ángulo de contacto.
4. **Reacciones químicas.** Reacciones químicas entre el sólido y el líquido que favorecen o empobrecen los enlaces moleculares.
5. **Alteraciones en el sólido.** El sólido puede empezar a disolverse o hincharse por contacto con el líquido.

El hecho de que se haya elegido este método de medición, gota en reposo, no es casual. Al utilizar probetas relativamente pequeñas para la cantidad de valores que nos conviene obtener para que el valor ponderado sea más coherente, nos impone que las gotas sean de pequeño tamaño. En el método de gota sésil la aguja no debe estar dentro de la gota, sino fuera de ella en el momento de la medición; al tratarse de gotas de escaso volumen, el que la aguja se encontrara en el interior podría hacer que la gota se deformara obteniendo valores erróneos.

Para cada condición de tratamiento de plasma se utilizará una sola probeta de cada material. El tratamiento sólo se realiza por la superficie expuesta, no la apoyada, por lo que cada probeta se tratará dos veces, una en cada superficie. Una vez medido el ángulo de contacto, la probeta queda inservible por las modificaciones sufridas y las que pueda sufrir en el tiempo.

Para medir los ángulos de contacto hemos seguido una serie de pasos que comentaremos a continuación:

1. Se introducirá un recipiente en el porta-probetas con el líquido de medida para que sature el vapor y así evitar en todo lo posible la evaporación de las gotas depositadas en la superficie.
2. Una vez realizado el tratamiento de plasma a la probeta, se introducirá en el portaprobetas para que la degradación con la atmósfera sea la mínima, a menos que se desee aplicar un proceso de envejecimiento de la probeta.
3. Cuando la probeta se encuentre correctamente situada en el portaprobetas, procedemos a colocar la aguja a escasa distancia de la superficie de la probeta. Con cuidado, y gracias a los ajustadores de posición del portajeringuillas y del portaprobetas, hacemos coincidir la aguja en la imagen de la cámara, teniendo un objeto sólido que enfocar, controlando también el contraste con la luz frontal.

4. Se deposita una gota en la superficie de la probeta, a suficiente distancia de los extremos de la probeta, porque la estructura ahí puede ser irregular debido al corte que ha sufrido.
5. Con el software encargado de la medición del ángulo de contacto realizamos una captura al perfil de la gota para así no tener variaciones ni de volumen ni de superficie.
6. Se comienza a estudiar la imagen, primero señalando dónde se encuentra la superficie de contacto líquido-sólido, que en este caso se trata del eje de simetría.
7. En segundo lugar se intenta ajustar una curva que recorra el perfil de la superficie vapor-líquido, con 5 puntos puede ser suficiente, teniendo especial atención en precisar en la zona cercana al contacto con el sólido ya que el ángulo de contacto es el resultado que nos interesa, por lo que es necesario que se encuentre ajustada en esa zona. Si la silueta de la gota es muy nítida, el propio programa puede calcularlo automáticamente siendo estrictamente preciso.
8. Calculada la línea de contacto y el perfil, el programa se encarga de calcular el ángulo de contacto.
9. Se repetirán todos los pasos desde el quinto, según el número de medidas deseadas, desplazando el portaprobetas lo suficiente para dejar distancia entre la anterior gota y la futura, porque si se encuentran demasiado cerca pueden modificar sus respectivos equilibrios.



### 3. *RESULTADOS Y DISCUSIÓN*

#### 3.1 ENSAYOS PLASMA

##### 3.1.1 Introducción

El objetivo que queremos alcanzar en estos ensayos es estudiar la influencia que suponen variables como el tiempo de exposición o la potencia sobre la efectividad de la activación de las superficies, excluyendo el gas utilizado de esta ecuación porque será siempre aire, y por lo tanto no influirá. Las probetas serán rectangulares de (80x25x2)mm de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE). El datos que vamos a obtener que permita realizar este estudio es el ángulo de contacto, que lo mediremos utilizando dos líquidos de medida distintos, agua destilada y diyodometano.

Una vez realizados los ensayos pertinentes, se pretende realizar unas gráficas del ángulo de contacto, con ambos líquidos, en función del tiempo de tratamiento en la cámara de plasma. A partir de las gráficas, se podrá deducir cuales son las condiciones óptimas para que la superficie del polímero posea la mayor energía superficial, tanto la potencia como el tiempo.

Los datos obtenidos en este ensayo se pueden consultar en el **Anexo I**.

### 3.1.2 Procedimiento de trabajo

A continuación se explica el procedimiento que se ha llevado a cabo para realizar el tratamiento de plasma:

1. Limpieza de la superficie de las probetas de polipropileno con metiletilcetona (MEK). Solamente es necesario la limpieza de la cara a tratar, la que se encuentra en la base de la probeta no es necesario.
2. Introducción de la probeta en la cámara con cuidado de no tocar la superficie a tratar.
3. Encendido de la bomba de vacío para producir bajas presiones y dejar cerrada la cámara. Se permite la entrada de un fujo de aire al interior de la cámara.
4. Se empieza con el tratamiento de plasma, para ello se tendrán en cuenta dos posibles variables:
  - Se han utilizado las tres posiciones de potencia de la cámara de plasma: low (7,16W), médium (10,15W) y high (29,6W).
  - Se han elegido cinco tiempos de tratamiento, en minutos, para cada potencia de trabajo: 1, 3, 5, 10 y 15.
5. No tendremos en cuenta el valor del caudal de aire que entra en la cámara, ni tampoco será preciso conocer el valor de la presión en el interior de la cámara. Las diferencias entre el resultado final de la energía superficial y el inicial apenas se ven modificadas porque se alteren estas variables. En el caso de la presión, es importante que la presión en el interior sea suficientemente baja, pero el valor nos es indiferente.

6. Cuando el tiempo de tratamiento establecido para ese ensayo ha finalizado, apagamos el Plasma Cleaner y posteriormente la bomba de vacío. Igualamos la presión del interior de la cámara con la exterior y sacamos la probeta con rapidez y cuidado de no tocar la superficie alterada. Colocamos la probeta en el portaprobetas para calcular el ángulo de contacto.
7. Anotamos el ángulo de contacto de al menos siete gotas de agua y de diiodometano.

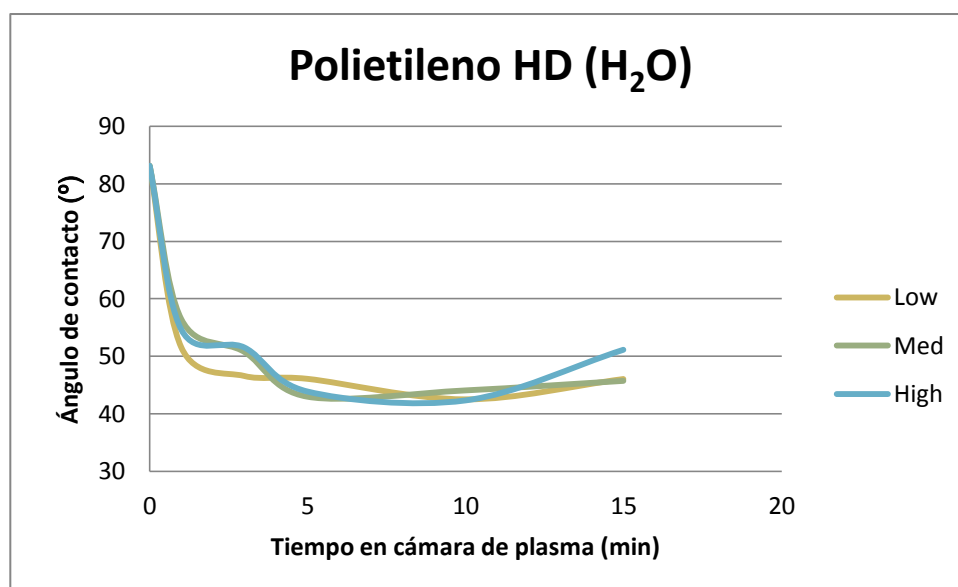
### 3.1.3 Análisis de resultados

El primer paso es establecer el origen desde donde estudiar los efectos del tratamiento de plasma, por lo que se calcula el ángulo de contacto que poseen las gotas de agua destilada y diiodometano en la superficie sin tratar de los polímeros. El ángulo obtenido utilizando agua destilada es de  $91^{\circ}5'$  para el polipropileno y de  $83^{\circ}1'$  en el caso del polietileno de alta densidad. En el caso del diiodometano los ángulos son menores que los obtenidos con agua destilada; en probetas de polipropileno el ángulo de contacto es de  $70^{\circ}9'$ , mientras que en las probetas de polietileno sólo alcanza un valor de  $52^{\circ}8'$ .

Posteriormente hemos aplicado el tratamiento de activación a las superficies modificando las variables mencionadas anteriormente en el apartado 3.1.2. Midiendo a continuación el ángulo de contacto de la gota. El software del equipo de medición del ángulo de contacto de las gotas calcula el ángulo izquierdo y derecho del perfil del líquido sobre la superficie de la probeta, por lo que se utilizará la media de los dos como referente en el estudio posterior. Todos estos datos se encuentran en el **Anexo I**.

En la Tabla 2 (ANEXO II) se representan los resultados obtenidos en los ángulos de contacto medidos en probetas de polietileno de alta densidad en función del tiempo de exposición, del líquido utilizado en las gotas, de la potencia de radiofrecuencias de la cámara de plasma.

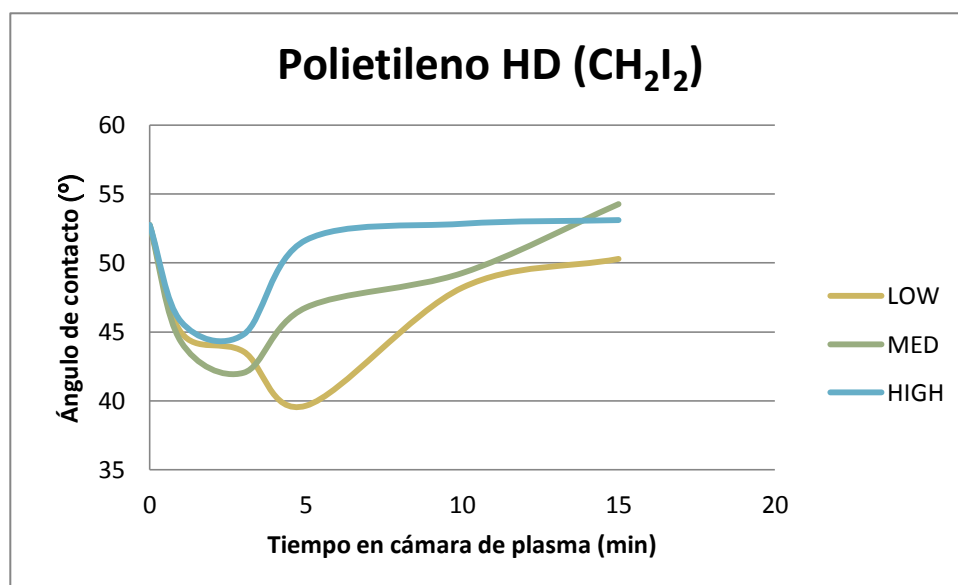
La representación de la tabla 2 mostrada a continuación en las gráficas 1 y 2 permite observar con mayor rapidez la tendencia en la variación de los ángulos de contacto con el polietileno. La primera de las dos nos informa del ángulo de las gotas de agua destilada.



Gráfica 1. Variación del ángulo de contacto del agua destilada sobre la superficie de polietileno activada

Como se puede observar, el ángulo de contacto decrece drásticamente en el instante inicial para, posteriormente, estabilizarse consiguiendo el mínimo ángulo cuando con la mayor potencia (29,6W) han transcurrido 10 minutos de tratamiento. Este dato no es excesivamente relevante, porque la diferencia entre este mínimo ángulo de contacto, y el menor que han conseguido las otras dos potencias, apenas difiere un grado.

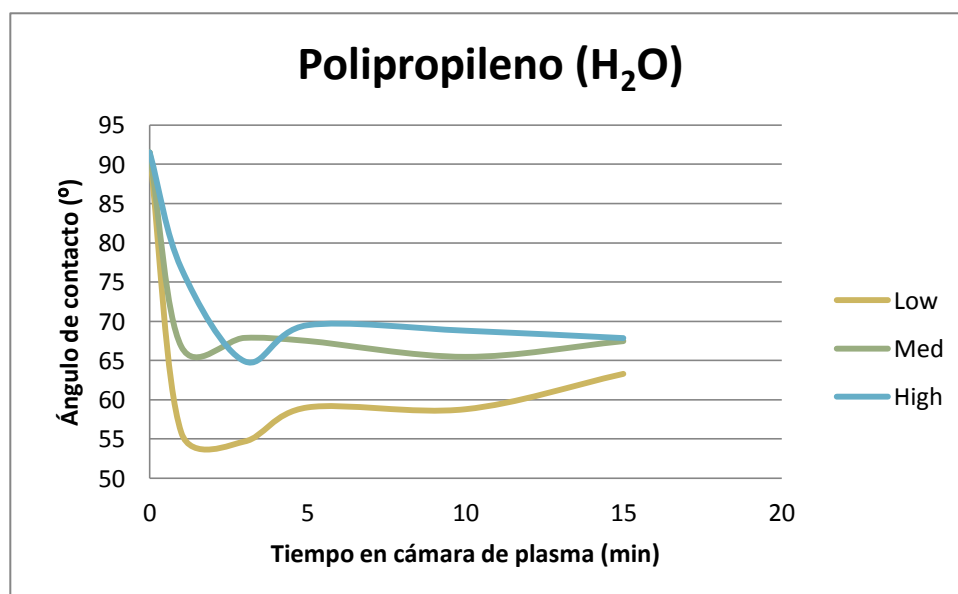
A continuación se representa la gráfica de la probeta de polietileno de alta densidad utilizando diiodometano como líquido de contacto. En la que se puede observar como en este ensayo sí que se observa una gráfica que destaca sobre las demás, la de baja potencia, adquiriendo un ángulo de contacto mínimo a los 5 minutos de tratamiento.



Gráfica 2. Variación del ángulo de contacto del diyodometano sobre la superficie de polietileno activada

Las probetas de polipropileno han sufrido los mismos ensayos que las probetas de polietileno con anterioridad, quedando representados en la tabla 3 (ANEXO II), también en función del líquido que hemos utilizado en las gotas, el tiempo de exposición en el interior de la cámara y la potencia a la que se ha realizado el tratamiento de las probetas. Hay que tener en cuenta que los ángulos que vamos a obtener en el polipropileno serán mayores que los observados en las probetas de polietileno de alta densidad, esto se debe a que el polipropileno tiene una energía superficial inferior a la del polietileno, por lo que su mojabilidad se encuentra todavía más mermada.

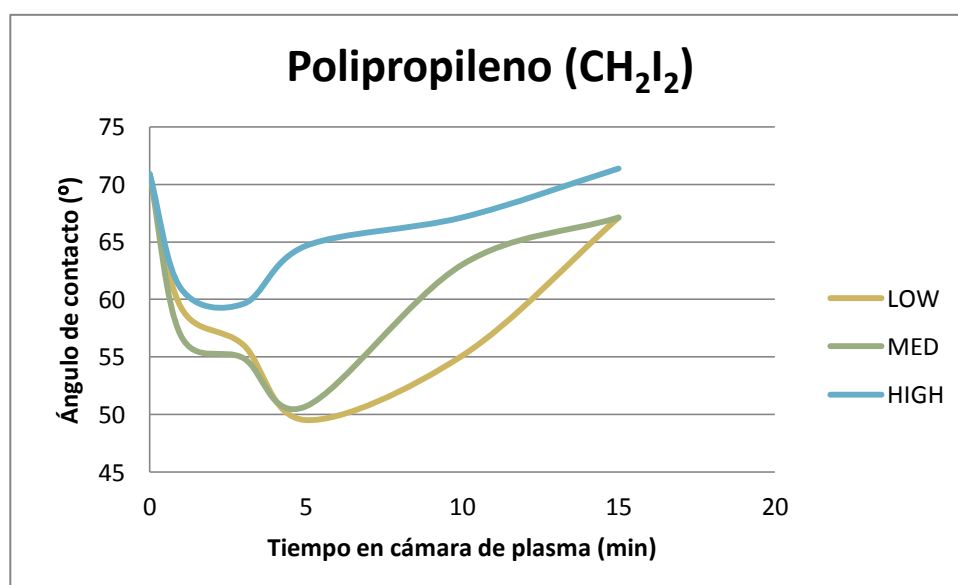
Podemos observar en la gráfica 3 el comportamiento de las probetas de polipropileno después de los tratamientos realizados utilizando agua destilada.



Gráfica 3. Variación del ángulo de contacto del agua destilada sobre la superficie de polipropileno activada

En este caso no cabe lugar a la duda, hay una curva que discurre durante todo el ensayo por debajo de las demás, la curva de baja potencia. Sin lugar a ninguna duda en este caso ofrece un comportamiento muy superior a las otras potencias, alcanzado a los 3 minutos de tratamiento su menor ángulo de contacto.

Con el diyodometano ocurre algo parecido.



Gráfica 4. Variación del ángulo de contacto del diyodometano sobre la superficie de polietileno activada

Lo único, que en este caso hay dos curvas de potencia que hacen descartar la tercera, la de la mayor potencia (29.6W). Las otras dos, sin embargo, discurren a la par, aunque es verdad que el mínimo ángulo de contacto se consigue con la menor potencia, tampoco nos indica que el efecto sea mucho mejor que con media potencia, puesto que apenas se diferencian sus mínimos ángulos de contacto en un grado.

Con la ayuda de las gráficas anteriores se puede decidir cuáles son las condiciones óptimas para que el tratamiento sea lo más efectivo posible. Como se puede observar, los resultados del tratamiento varían en función del tiempo y de la potencia que se le aplica a la cámara. La intención de este estudio es la de conseguir el menor ángulo posible en cada caso.

Como podemos observar, no hay ninguna combinación de variables que destaque en todas las superficies por encima de las demás; sin embargo, se puede afirmar que cuando se aplica un tratamiento de 5 minutos a una potencia de 7.16W, tiene un comportamiento muy regular en todos los casos. Es muy complicado que siempre tenga el mismo comportamiento porque existen muchas más variables de las que inicialmente controlamos, como puede ser la evaporación de la gota, irregularidades en la probeta, etc.

A partir de esta suposición, se han considerado estas condiciones como las más efectivas para aumentar la energía superficial del polímero. Se utilizarán estas condiciones para obtener los valores de energía superficial después del tratamiento. Anteriormente se han calculado los ángulos obtenidos en ese proceso, de los cuáles obtendremos el valor de la energía superficial. Además, con el fin de intentar ser más precisos con los resultados, se ha repetido el proceso en una probeta de cada polímero, pero esta vez utilizando glicerol para calcular el ángulo de contacto, obteniendo unos valores de 65° en polipropileno y 56° en el polietileno de alta densidad. Tendiendo unos ángulos de contacto originales en la superficie sin tratar de 96° y 82° respectivamente. En el ANEXO I se adjuntan los valores de los ángulos de contacto con glicerol

Con la ayuda del programa SCA20, con los ángulos de contacto en las condiciones establecidas, y mediante el método OWRK (El método de Owens, Wendt, Rabel y Kaelble) ha calculado la energía superficial del polímero. Este método necesita como mínimo dos valores, además del valor de la tensión superficial del líquido para el ángulo de contacto. Mediante una recta de regresión calcula el valor teórico de la energía superficial, dividiéndose esta en la suma de la energía superficial dispersa y la polar. La adición de un tercer valor, el calculado con glicerol, hace precisar más la recta y así obtener un valor fidedigno.

Las energías superficiales obtenidas en el SCA20 son las siguientes:

*Tabla 1. Energías superficiales del polipropileno y polietileno antes y después de ser tratadas*

	<b>Energía superficial (mN/m)</b>					
	<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
	<b>Et</b>	<b>Ed</b>	<b>Ep</b>	<b>Et</b>	<b>Ed</b>	<b>Ep</b>
<b>Sin tratamiento</b>	21	17,79	3,21	31,4	27,79	3,61
<b>Condiciones óptimas</b>	41,74	27,49	14,25	51,96	32,48	19,48

Se puede observar el aumento considerable de la energía superficial que sufren las probetas, llegando a doblar su medida inicial gracias a la aplicación del plasma.



## 4. *CONCLUSIONES*

Después de la teoría aprendida en la primera parte de este Proyecto Fin de Carrera, la experiencia contada posteriormente y por último, los resultados obtenidos en el laboratorio midiendo el ángulo de contacto después del tratamiento de plasma en vacío y las energías superficiales, se han llegado a alcanzar ciertas conclusiones.

Se puede afirmar que en un tratamiento de plasma en vacío, la potencia del campo magnético no es directamente proporcional al resultado obtenido. Se ha podido comprobar que la mayor energía superficial obtenida en los ensayos se ha obtenido aplicando la mínima potencia que el Plasma Cleaner nos permite. Tampoco es directamente proporcional el tiempo que le apliquemos. Una vez que el tratamiento dura más de 5 minutos, el valor del ángulo de contacto tiende a crecer, y finalmente, estabilizarse.

La utilización de aire en estado de plasma, da excelentes resultados en la activación de la superficie, aumentando su energía superficial en prácticamente el doble. Hay que tener en cuenta que introducir aire en el interior de la cámara es una alternativa económica al oxígeno y al nitrógeno, debido a que es mucho más económico y accesible.

Cuando el tiempo de tratamiento es muy elevado el ángulo de contacto aumenta considerablemente, como se ha mencionado con anterioridad. Esto se debe como consecuencia de la gran cantidad de energía que se ha aplicado a la probeta. Aditivos que se encuentran en las cadenas poliméricas migran desde el interior del material a la superficie de este, modificando la activación del polímero al variar sus cadenas poliméricas superficiales.

Comparando este estudio con estudios alternativos sobre la activación de la superficie con otros métodos, se llega a la conclusión de que el tratamiento en cámara de plasma a bajas presiones no es el más recomendado para ser introducido en cadenas de producción. Su explicación es sencilla: la cámara de plasma utilizada en los ensayos es de un tamaño reducido, por lo que la aplicación de este tratamiento se vería reducida a pequeñas cantidades de piezas a tratar. Esto mermaría la producción en grandes proporciones. Además, hay que tener en cuenta que el uso de estas cámaras prácticamente imposibilita la automatización de la cadena, siendo necesaria la actuación humana en la introducción y extracción de las piezas en su interior. Otro aspecto que crea un problema es el tiempo dedicado en el tratamiento. Las piezas necesitarían 5 minutos para la activación de la superficie, además del tiempo de espera desde que se introduce la probeta y se enciende la bomba de vacío hasta que la presión en su interior es suficientemente baja para la formación del plasma. Por todas estas razones, la implantación de este método de activación de superficies es poco recomendado, siendo más aconsejables métodos como el plasma atmosférico o de llama.

Por otra parte, este procedimiento se hace necesario en piezas de geometría irregular; la llama de plasma no alcanza recovecos de la pieza, mientras que en la cámara, al encontrarse en contacto total con el plasma, toda la superficie de la pieza no apoyada sufre la activación. Además, se recomienda su uso en laboratorio por conseguir un resultado más homogéneo en toda la superficie del material, lo cual permite un estudio posterior más eficiente y realista que con otros métodos de activación.

## 5. *TRABAJO FUTURO*

Tras el estudio en profundidad de este Proyecto Fin de Carrera se contemplan nuevos horizontes donde seguir desarrollando este tema con nuevos estudios directa o indirectamente relacionados. Entre otros podemos mencionar nuevas líneas de investigación como:

El estudio de materiales distintos a los utilizados en este proyecto, ampliando el campo de efecto a probetas metálicas u otros materiales poliméricos. Observando si los efectos son iguales, si las condiciones más efectivas son las mismas, etc. También se aprendería mucho si se modificara el gas que se insufla en el interior de la cámara

de vacío. Contrarrestar los resultados si el gas introducido fuera, en lugar de aire atmosférico, oxígeno u otro gas que favoreciese la activación de la superficie.

La inclusión de más variables. Una variable de estudio muy interesante es el tiempo transcurrido entre el tratamiento de aumento de la energía superficial y la medición del ángulo de contacto. La energía superficial alcanzada en la superficie de la probeta tras la activación no es constante; según se avanza en el tiempo, esta energía va disminuyendo paulatinamente, por lo que si se desea aplicar posteriormente un tratamiento de lacado, pintura, adhesivo, etc., se recomienda hacerlo inmediatamente a continuación del tratamiento de plasma para aprovechar las excelentes propiedades que todavía mantiene.

A continuación del tratamiento de plasma, es interesante medir la eficiencia de un adhesivo en contacto con la superficie. Para ello es aconsejable realizar mediante pruebas de esfuerzos (tracción, compresión, fatiga...) un estudio sobre la efectividad del adhesivo antes y después del tratamiento. Obteniendo resultados que tienen repercusión directa en la posterior comercialización del producto.

Con ayuda de los conocimientos y experiencias expuestos en este Proyecto Fin de Carrera, y la correcta puesta en práctica de éstos, se persigue que las futuras aplicaciones de este estudio sean múltiples y muy variadas.

## 6. ANEXO DE DATOS

### ANEXO I: TRATAMIENTO EN CÁMARA DE PLASMA

A continuación se incluye los ángulos de contacto recogidas en cada una de las pruebas realizadas en el medidor de ángulos:

1) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7,16W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **1 minuto**

<b>1min LOW H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
53,40	52,90	52,40	53,10	52,50	51,90
51,40	50,70	50,00	55,30	54,80	54,30
50,20	48,55	46,90	52,30	52,45	52,60
53,40	52,40	51,40	51,10	51,10	51,10
61,00	60,60	60,20	50,20	50,15	50,10
64,10	63,10	62,10	51,10	51,25	51,40
55,80	57,90	60,00	50,50	50,85	51,20
60,70	60,40	60,10	49,80	49,55	49,30
56,25	<b>55,82</b>	55,39	51,68	<b>51,58</b>	51,49

2) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7,16W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **3 minutos**

<b>3min LOW H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
56,30	55,60	54,90	46,10	46,10	46,10
53,40	53,60	53,80	47,00	47,40	47,80
58,00	57,45	56,90	46,90	46,85	46,80
56,00	55,60	55,20	47,60	47,30	47,00
59,90	58,70	57,50	46,70	46,30	45,90
52,70	52,60	52,50	45,40	45,65	45,90
52,20	52,15	52,10	46,60	46,55	46,50
51,50	51,65	51,80	46,90	46,60	46,30
55,00	<b>54,67</b>	54,34	46,65	<b>46,59</b>	46,54

3) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7,16W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **5 minutos**

<b>5min LOW H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
56,30	56,90	57,50	47,10	47,20	47,30
54,50	55,00	55,50	47,20	47,10	47,00
58,90	58,15	57,40	45,70	46,00	46,30
59,20	59,15	59,10	45,60	45,75	45,90
61,90	61,15	60,40	43,80	44,15	44,50
59,10	59,70	60,30	45,90	44,50	43,10
62,20	61,55	60,90	50,90	49,85	48,80
56,20	55,80	55,40	45,70	45,85	46,00
63,80	63,75	63,70	44,80	44,50	44,20
59,12	<b>59,02</b>	58,91	46,30	<b>46,10</b>	45,90



4) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7,16W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **10 minutos**

<b>10min LOW H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
61,10	61,20	61,30	42,70	43,15	43,60
59,10	59,10	59,10	40,90	41,20	41,50
59,70	59,55	59,40	38,20	38,95	39,70
59,70	59,90	60,10	40,20	40,30	40,40
59,70	59,90	60,10	40,60	40,65	40,70
56,70	57,00	57,30	38,90	38,65	38,40
56,60	57,25	57,90	38,90	39,25	39,60
56,90	55,55	54,20	40,00	40,15	40,30
59,30	59,60	59,90	39,00	38,80	38,60
58,76	<b>58,78</b>	58,81	39,93	<b>40,12</b>	40,31

5) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7,16W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **15 minutos**

<b>15min LOW H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
66,70	66,65	66,60	46,00	46,65	47,30
64,50	64,55	64,60	48,20	48,30	48,40
65,00	64,80	64,60	44,80	44,95	45,10
64,10	64,05	64,00	45,20	45,40	45,60
63,40	62,80	62,20	45,20	45,20	45,20
61,90	62,45	63,00	46,30	46,35	46,40
59,70	60,20	60,70	44,90	43,80	42,70
60,00	60,85	61,70	47,40	47,90	48,40
63,16	<b>63,29</b>	63,43	46,00	<b>46,07</b>	46,14

6) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **10,15W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **1 minuto**

<b>1min MED H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
67,70	67,45	67,20	53,60	54,65	55,70
67,20	66,65	66,10	54,80	55,40	56,00
67,30	67,00	66,70	58,60	58,90	59,20
64,50	65,15	65,80	57,50	57,30	57,10
68,50	67,55	66,60	56,90	57,50	58,10
68,90	68,80	68,70	53,10	54,75	56,40
66,20	65,65	65,10	57,90	57,10	56,30
65,60	66,00	66,40	55,90	56,15	56,40
66,99	<b>66,78</b>	66,58	56,04	<b>56,47</b>	56,90

7) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **10,15W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **3 minutos**

<b>3min MED H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
70,90	70,65	70,40	50,80	50,90	51,00
68,90	69,30	69,70	51,00	51,11	51,22
69,00	68,55	68,10	50,80	50,85	50,90
69,30	68,65	68,00	50,00	49,50	49,00
68,20	68,20	68,20	51,50	51,55	51,60
66,70	66,95	67,20	50,90	50,55	50,20
66,50	66,10	65,70	51,00	50,50	50,00
64,90	64,55	64,20	51,60	51,15	50,70
68,05	<b>67,87</b>	67,69	50,95	<b>50,76</b>	50,58

8) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **10,15W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **5 minutos**

<b>5min MED H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
68,30	67,95	67,60	44,40	44,70	45,00
71,30	71,75	72,20	43,30	43,25	43,20
68,80	67,95	67,10	45,40	45,40	45,40
68,40	68,05	67,70	44,80	44,40	44,00
68,00	67,35	66,70	42,70	43,15	43,60
65,40	65,00	64,60	41,40	40,45	39,50
67,50	67,60	67,70	40,80	40,30	39,80
64,80	64,20	63,60	42,10	42,25	42,40
67,81	<b>67,48</b>	67,15	43,11	<b>42,99</b>	42,86

9) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **10,15W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **10 minutos**

<b>10min MED H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
64,00	64,20	64,40	42,70	43,30	43,90
65,80	65,85	65,90	44,50	44,80	45,10
65,40	65,40	65,40	41,80	41,45	41,10
65,90	65,70	65,50	43,30	43,00	42,70
64,80	64,85	64,90	44,20	44,00	43,80
65,90	65,70	65,50	43,90	44,15	44,40
65,70	65,65	65,60	48,70	47,90	47,10
66,60	66,25	65,90			
65,51	<b>65,45</b>	65,39	44,16	<b>44,09</b>	44,01

10) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **10,15W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **15 minutos**

<b>15min MED H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
68,40	68,45	68,50	43,90	43,80	43,70
67,00	66,80	66,60	46,20	46,25	46,30
68,10	67,95	67,80	47,70	47,55	47,40
65,50	66,40	67,30	47,50	47,40	47,30
67,50	67,30	67,10	46,40	46,00	45,60
68,00	68,00	68,00	45,70	45,50	45,30
66,90	67,25	67,60	45,30	45,35	45,40
67,80	67,50	67,20	43,60	44,05	44,50
67,40	<b>67,46</b>	67,51	45,79	<b>45,74</b>	45,69

11) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **29,6W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **1 minuto**

<b>1min HIGH H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
78,20	78,25	78,30	55,30	55,15	55,00
78,60	78,40	78,20	53,60	54,10	54,60
78,20	77,85	77,50	52,60	53,05	53,50
78,30	77,50	76,70	54,80	55,05	55,30
76,60	76,65	76,70	54,70	54,70	54,70
75,80	75,80	75,80	56,50	56,05	55,60
74,80	74,80	74,80	53,80	54,70	55,60
74,70	75,00	75,30	54,00	54,25	54,50
76,90	<b>76,78</b>	76,66	54,41	<b>54,63</b>	54,85



12) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **29,6W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **3 minutos**

<b>3min HIGH H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
65,00	64,85	64,70	52,10	51,90	51,70
64,00	63,95	63,90	51,30	51,55	51,80
64,80	65,35	65,90	51,30	51,45	51,60
65,10	64,75	64,40	52,40	52,10	51,80
65,40	65,40	65,40	50,70	50,60	50,50
65,40	65,15	64,90	51,80	52,00	52,20
64,90	64,90	64,90	50,70	51,00	51,30
65,00	65,10	65,20	51,30	51,45	51,60
64,95	<b>64,93</b>	64,91	51,45	<b>51,51</b>	51,56

13) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **29,6W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **5 minutos**

<b>5min HIGH H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
68,90	68,70	68,50	44,40	44,40	44,40
70,20	70,75	71,30	41,70	39,90	38,10
70,20	70,25	70,30	44,00	43,20	42,40
71,00	70,70	70,40	43,60	43,65	43,70
69,90	70,55	71,20	46,10	45,70	45,30
69,30	69,10	68,90	42,80	43,10	43,40
68,50	68,70	68,90	42,40	42,80	43,20
68,80	68,75	68,70	45,80	45,55	45,30
68,40	68,20	68,00	46,20	46,35	46,50
69,47	<b>69,52</b>	69,58	44,11	<b>43,85</b>	43,59

14) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **29,6W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **10 minutos**

<b>10min HIGH H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
67,00	67,65	68,30	43,10	44,30	45,50
68,70	68,50	68,30	44,10	43,90	43,70
69,30	69,45	69,60	43,60	42,65	41,70
70,60	70,75	70,90	40,70	40,75	40,80
69,00	68,85	68,70	42,50	41,60	40,70
67,80	68,10	68,40	42,10	41,85	41,60
68,80	68,90	69,00	41,80	41,85	41,90
68,30	68,35	68,40	42,00	42,10	42,20
68,60	68,85	69,10	41,60	41,75	41,90
68,68	<b>68,82</b>	68,97	42,39	<b>42,31</b>	42,22

15) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **29,6W**
- Líquido de gota: **Agua**
- Tiempo de tratamiento: **15 minutos**

<b>15min HIGH H2O</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
65,90	65,60	65,30	52,60	52,50	52,40
68,80	67,35	65,90	51,30	51,50	51,70
69,00	69,20	69,40	52,80	52,65	52,50
68,90	69,05	69,20	51,30	51,75	52,20
68,80	68,70	68,60	50,90	50,80	50,70
68,40	68,30	68,20	49,20	49,40	49,60
67,20	66,65	66,10	50,00	50,30	50,60
67,60	68,25	68,90	48,90	49,45	50,00
67,70	67,80	67,90	51,50	51,65	51,80
68,03	<b>67,88</b>	67,72	50,94	<b>51,11</b>	51,28

16) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7,16W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **1 minuto**

<b>1min LOW Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
60,30	59,55	58,80	41,80	43,05	44,30
58,70	59,30	59,90	43,70	44,65	45,60
60,20	60,65	61,10	45,30	46,00	46,70
58,50	58,60	58,70	44,50	44,90	45,30
58,60	59,00	59,40	44,00	45,10	46,20
57,80	58,05	58,30	44,70	44,70	44,70
59,10	59,55	60,00	44,10	43,55	43,00
59,50	59,90	60,30	46,20	46,40	46,60
			46,30	46,30	46,30
59,09	<b>59,33</b>	59,56	44,51	<b>44,96</b>	45,41

17) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7,16W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **3 minutos**

<b>3min LOW Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
56,20	55,45	54,70	44,80	44,40	44,00
57,00	56,85	56,70	45,00	44,85	44,70
55,20	55,75	56,30	44,40	44,75	45,10
53,50	53,50	53,50	42,40	42,45	42,50
53,80	53,65	53,50	42,60	42,70	42,80
56,10	56,85	57,60	41,70	42,30	42,90
55,80	56,20	56,60	43,50	43,40	43,30
57,00	57,25	57,50	43,10	43,70	44,30
58,70	59,00	59,30			
55,92	<b>56,06</b>	56,19	43,44	<b>43,57</b>	43,70

18) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7,16W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **5 minutos**

<b>5min LOW Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
50,60	51,45	52,30	38,70	39,65	40,60
49,70	49,85	50,00	38,40	38,05	37,70
49,80	50,15	50,50	40,50	41,35	42,20
48,60	49,05	49,50	41,10	41,60	42,10
48,50	48,90	49,30	38,60	38,70	38,80
49,00	49,45	49,90	40,40	40,20	40,00
49,00	49,25	49,50	40,60	41,15	41,70
48,50	48,50	48,50	37,60	37,35	37,10
49,50	49,20	48,90	40,10	38,65	37,20
49,24	<b>49,53</b>	49,82	39,56	<b>39,63</b>	39,71

19) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7,16W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **10 minutos**

<b>10min LOW Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
55,80	55,95	56,10	48,60	48,20	47,80
55,10	56,20	57,30	51,30	50,80	50,30
58,30	59,30	60,30	47,30	49,10	50,90
54,80	56,45	58,10	48,40	48,65	48,90
54,70	55,60	56,50	46,30	46,90	47,50
54,60	54,00	53,40	47,40	48,05	48,70
53,00	53,75	54,50	46,40	46,70	47,00
52,70	52,60	52,50	46,70	47,45	48,20
52,10	52,30	52,50	47,40	47,95	48,50
54,57	<b>55,13</b>	55,69	47,76	<b>48,20</b>	48,64



20) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7,16W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **15 minutos**

<b>15min LOW Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
66,90	68,65	70,40	45,30	47,85	50,40
66,80	67,60	68,40	49,80	50,40	51,00
64,40	64,80	65,20	48,00	48,90	49,80
66,90	66,95	67,00	50,30	50,95	51,60
66,50	66,35	66,20	52,00	52,05	52,10
66,40	66,75	67,10	52,00	52,00	52,00
68,20	68,55	68,90	48,90	49,90	50,90
67,30	67,60	67,90	51,90	52,05	52,20
67,20	66,85	66,50	47,60	48,50	49,40
66,73	<b>67,12</b>	67,51	49,53	<b>50,29</b>	51,04

21) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **10,15W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **1 minuto**

<b>1min MED Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
56,00	56,15	56,30	43,20	42,65	42,10
56,20	56,60	57,00	43,30	42,35	41,40
57,40	58,30	59,20	45,60	45,00	44,40
56,60	57,05	57,50	43,40	43,75	44,10
56,00	56,30	56,60	44,00	44,15	44,30
55,60	55,55	55,50	44,00	44,55	45,10
56,90	57,20	57,50	44,00	45,05	46,10
57,20	57,15	57,10	44,00	45,65	47,30
57,00	57,30	57,60	44,90	45,55	46,20
56,54	<b>56,84</b>	57,14	44,04	<b>44,30</b>	44,56

22) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **10,15W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **3 minutos**

<b>3min MED Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
54,50	54,45	54,40	40,80	41,75	42,70
53,50	53,35	53,20	41,90	42,30	42,70
53,40	54,35	55,30	41,70	41,80	41,90
55,50	56,40	57,30	41,50	41,80	42,10
54,30	54,90	55,50	41,40	42,00	42,60
54,50	54,55	54,60	41,80	41,75	41,70
53,90	54,70	55,50	42,20	41,80	41,40
54,40	55,15	55,90	42,40	42,30	42,20
55,20	56,15	57,10	42,50	42,90	43,30
54,36	<b>54,89</b>	55,42	41,80	<b>42,04</b>	42,29

23) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **10,15W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **5 minutos**

<b>5min MED Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
50,90	51,80	52,70	44,70	45,75	46,80
51,20	51,25	51,30	44,00	45,55	47,10
49,90	50,50	51,10	46,10	47,70	49,30
51,70	50,75	49,80	47,30	47,40	47,50
50,80	50,30	49,80	46,90	47,30	47,70
50,80	50,95	51,10	46,60	47,80	49,00
49,90	50,15	50,40	47,40	47,40	47,40
49,70	49,80	49,90	45,60	45,60	45,60
50,00	50,80	51,60	46,50	46,50	46,50
50,54	<b>50,70</b>	50,86	46,12	<b>46,78</b>	47,43

24) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **10,15W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **10 minutos**

<b>10min MED Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
64,90	65,15	65,40	47,80	47,85	47,90
64,70	64,35	64,00	47,60	48,30	49,00
64,00	64,50	65,00	48,40	48,45	48,50
63,80	64,45	65,10	49,10	49,95	50,80
63,20	63,25	63,30	49,20	49,15	49,10
62,80	63,05	63,30	52,50	47,05	41,60
60,40	60,60	60,80	52,10	51,55	51,00
60,70	60,85	61,00	50,30	50,05	49,80
60,90	61,05	61,20	51,70	51,15	50,60
62,82	<b>63,03</b>	63,23	49,86	<b>49,28</b>	48,70

25) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **10,15W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **15 minutos**

<b>15min MED Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
66,90	68,65	70,40	55,50	55,15	54,80
66,80	67,60	68,40	53,70	53,10	52,50
64,40	64,80	65,20	54,00	53,65	53,30
66,90	66,95	67,00	56,50	54,95	53,40
66,50	66,35	66,20	54,70	54,10	53,50
66,40	66,75	67,10	55,00	55,05	55,10
68,20	68,55	68,90	53,40	55,00	56,60
67,30	67,60	67,90	54,30	53,95	53,60
67,20	66,85	66,50	52,60	53,55	54,50
66,73	<b>67,12</b>	67,51	54,41	<b>54,28</b>	54,14

26) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **29,6W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **1 minuto**

<b>1min HIGH Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
61,00	61,10	61,20	43,00	44,50	46,00
61,00	61,30	61,60	44,50	45,35	46,20
60,40	60,40	60,40	44,80	45,90	47,00
61,10	61,45	61,80	45,60	45,85	46,10
61,30	61,50	61,70	45,10	45,60	46,10
60,60	60,70	60,80	45,70	46,00	46,30
59,80	60,30	60,80	47,10	47,00	46,90
60,90	61,35	61,80	45,90	45,70	45,50
59,90	60,45	61,00	46,30	46,00	45,70
60,67	<b>60,95</b>	61,23	45,33	<b>45,77</b>	46,20

27) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **29,6W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **3 minutos**

<b>3min HIGH Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
58,50	57,40	56,30	40,70	42,85	45,00
61,00	61,40	61,80	44,00	46,25	48,50
57,90	58,40	58,90	40,10	41,75	43,40
59,30	60,10	60,90	42,80	43,80	44,80
59,50	60,35	61,20	43,30	44,35	45,40
57,60	57,70	57,80	45,40	46,05	46,70
61,80	60,80	59,80	45,90	46,25	46,60
59,30	60,15	61,00	46,40	46,30	46,20
60,30	60,20	60,10	46,20	45,80	45,40
59,47	<b>59,61</b>	59,76	43,87	<b>44,82</b>	45,78



28) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **29,6W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **5 minutos**

<b>5min HIGH Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
63,10	62,20	61,30	50,50	50,60	50,70
66,60	66,30	66,00	50,60	51,20	51,80
65,60	65,70	65,80	51,00	51,65	52,30
65,10	64,85	64,60	51,50	52,15	52,80
64,30	64,60	64,90	51,10	51,25	51,40
64,50	64,70	64,90	51,60	52,00	52,40
64,90	64,95	65,00	51,60	51,40	51,20
64,10	64,30	64,50	52,60	52,20	51,80
64,60	64,35	64,10	52,90	52,45	52,00
64,76	<b>64,66</b>	64,57	51,49	<b>51,66</b>	51,82

29) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **29,6W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **10 minutos**

<b>10min HIGH Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
69,50	70,15	70,80	56,20	55,60	55,00
67,80	68,10	68,40	54,10	53,80	53,50
68,90	69,05	69,20	54,80	54,65	54,50
65,40	65,35	65,30	52,00	52,00	52,00
63,20	63,95	64,70	50,20	49,95	49,70
64,50	64,55	64,60	50,80	50,15	49,50
67,70	67,75	67,80	51,00	51,25	51,50
65,00	65,05	65,10	51,90	51,95	52,00
70,60	70,30	70,00	55,30	56,15	57,00
66,96	<b>67,14</b>	67,32	52,92	<b>52,83</b>	52,74

30) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **29,6W**
- Líquido de gota: **Diyodo-metano**
- Tiempo de tratamiento: **15 minutos**

<b>15min HIGH Diyodo-Metano</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
71,90	72,30	72,70	54,60	54,90	55,20
73,30	73,20	73,10	54,10	55,00	55,90
72,70	72,95	73,20	54,30	54,50	54,70
70,50	70,85	71,20	53,40	52,95	52,50
70,70	70,80	70,90	52,10	52,15	52,20
69,80	70,35	70,90	51,60	51,55	51,50
69,50	70,00	70,50	52,30	52,45	52,60
71,70	72,10	72,50	52,50	53,15	53,80
70,10	70,05	70,00	51,60	51,25	50,90
71,13	<b>71,40</b>	71,67	52,94	<b>53,10</b>	53,26

31) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) sin tratamiento de plasma en vacío.

- Líquido de gota: **Glicerol**

<i>Sin tratamiento (Glicerol)</i>					
<i>PP</i>			<i>HDPE</i>		
<i>Izquierda</i>	<i>Media</i>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<i>Media</i>	<i>Derecha</i>
95,50	95,45	95,40	81,20	80,95	80,70
95,80	95,15	94,50	82,60	83,15	83,70
100,10	99,45	98,80	82,80	82,90	83,00
99,10	98,90	98,70	83,00	82,75	82,50
98,00	97,85	97,70	82,30	82,05	81,80
95,70	96,35	97,00	84,90	84,20	83,50
95,60	95,40	95,20	82,90	82,55	82,20
96,10	96,25	96,40	82,70	83,15	83,60
96,99	<b>96,85</b>	96,71	82,80	<b>82,71</b>	82,63

32) Probeta de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) con tratamiento de plasma en vacío.

- Potencia de trabajo: **7.16W**
- Líquido de gota: **Glicerol**
- Tiempo de tratamiento: **5 minutos**

<b>5min LOW (Glicerol)</b>					
<b>PP</b>			<b>HDPE</b>		
<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>	<i>Izquierda</i>	<b>Media</b>	<i>Derecha</i>
63,50	64,15	64,80	55,40	55,50	55,60
64,20	63,35	62,50	55,60	55,65	55,70
66,50	66,80	67,10	56,20	56,50	56,80
64,80	64,30	63,80	56,40	56,40	56,40
68,60	68,90	69,20	58,00	58,30	58,60
67,30	68,05	68,80	57,40	57,85	58,30
62,60	63,25	63,90	56,60	56,95	57,30
65,30	66,25	67,20	56,70	57,00	57,30
65,35	<b>65,63</b>	65,91	56,54	<b>56,77</b>	57,00



## ANEXO II: VALORES PROMEDIADOS DEL TRATAMIENTOS DE PLASMA

33) Promedio de los ángulos de contacto según condiciones de potencia y tiempo para el polietileno de alta densidad

Tabla 2. Ángulos de contacto del HDPE

		POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD					
		Gotas de H2O			Gotas de Diyodometano		
POTENCIA (W)		7,2	10,2	29,6	7,2	10,2	29,6
TIEMPO DE EXPOSICIÓN (min)	1	51,6	56,5	54,6	45,0	44,3	45,8
	3	46,6	50,8	51,5	43,6	42,0	44,8
	5	46,1	43,0	43,8	39,6	46,8	51,7
	10	42,5	44,1	42,3	48,2	49,3	52,8
	15	46,1	45,7	51,1	50,3	54,3	53,1

34) Promedio de los ángulos de contacto según condiciones de potencia y tiempo para el polipropileno.

Tabla 3. Ángulos de contacto del polipropileno

		POLIPROPILENO					
		Gotas de H2O			Gotas de Diyodometano		
POTENCIA (W)		7,16	10,15	29,6	7,16	10,15	29,6
TIEMPO DE EXPOSICIÓN (min)	1	55,8°	66,8°	76,8°	59,3°	56,8°	60,9°
	3	54,7°	67,9°	64,9°	56,1°	54,9°	59,6°
	5	59,0°	67,5°	69,5°	49,5°	50,7°	64,6°
	10	58,8°	65,4°	68,8°	55,1°	63,0°	67,1°
	15	63,3°	67,5°	67,9°	67,1°	67,1°	71,4°

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- *Manual de instrucciones de servicio de la Instalación de pretratamiento por plasma FG3001, Fab. Plasmatreteat.*
- *"User's manual for the expanded Plasma Cleaner (and optional Plasmaflo)", Fab. Harrick Plasma.*
- *"Manual de funcionamiento de OCA", Fab. Neurtek Instruments. España. 1998.*
- *F. Garbassi, Marco Morra y Ernesto Occhiello. "Polymer Surfaces: From Physics to Technology". Ed. John Wiley & Sons. UK. 1994.*
- *'Polymer Surface Modification: Relevance to adhesion' Ed. K.L. Mittal 2009.*
- *Ángel J. Díaz, 'Correlación entre Tratamientos Superficiales de Plasma en Vacío y Atmosféricos en Polímeros' (PFC) 2010*



- Chi-Ming Chan, 'Polymer Surface Modification and Characterization' Ed. SPE, 1994
- David Villagrà Sierra, 'Efecto del tratamiento superficial con plasma atmosférico sobre materiales met licos' (PFC) 2011
- Miguel Cogolludo Sánchez, 'Efecto del tratamiento superficial con plasma atmosférico en la adhesión de sustratos GRP', (PFC) 2010
- Kondyurin, A. V. 'Ion beam treatment of polymers' Ed. Elsevier, 2008
- N. Encinas. "Memoria del proyecto fin de Máster". Universidad Carlos III de Madrid. 2010.
- <http://www.quiaenvase.com/> (Agosto 2011)
- <http://www.plastico.com/> (Septiembre 2011)
- <http://jmckelliqet.eng.uml.edu/plasma.htm/> (Agosto 2011)
- [http://www.harrickplasma.com/applications\\_adhesion.php/](http://www.harrickplasma.com/applications_adhesion.php/) (Julio 2011)
- <http://www.avinent.com//> [Propiedades de superficies hidrófilas] (Septiembre 2011)
- <http://www.firp.ula.ve//> [Medición de tensión superficial] (Septiembre 2011)
- <http://www.plasmatreat.es//> [Plasma en automóviles] (Octubre 2011)
- <http://www.textoscientificos.com//> [Propiedades de los materiales] (Septiembre 2011)
- <http://www.shermantreaters.co.uk//> [Energía superficial] (Septiembre 2011)
- <http://www-istp.gsfc.nasa.gov//> [Historia del plasma] (Octubre 2011)
- <http://farside.ph.utexas.edu//> [Historia de la física del plasma] (Octubre 2011)